

文章编号: 1006-9941(2012)05-0610-04

## 电热火工品连续电磁波环境下响应规律

王可暄, 白颖伟, 任 炜, 程加奇

(陕西应用物理化学研究所应用物理化学重点实验室, 陕西 西安 710061)

**摘 要:** 为了研究电热火工品连续电磁波辐射环境下的响应和作用规律, 初步建立了电热火工品电磁波环境下的简化模型和理论公式, 采用电磁辐射模拟试验装置, 完成了场强、频率、引线长度及阻抗等重要特征参数对电热火工品连续电磁波辐射环境下的响应特性与效应试验。结果表明, 电热火工品连续电磁波辐射环境下感应电流的变化规律与理论公式一致, 且最大感应电流的变化与频率呈谐振特性。

**关键词:** 电磁学; 电热火工品; 电磁波环境; 感应电流

**中图分类号:** TJ45; O44

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.05.020

### 1 引 言

电热火工品是利用恒定或脉冲电流通过电阻发热而激发的火工品, 一般采用电热丝作为换能元, 其换能机理为电热换能机理, 始发药剂多采用以氮化铅为主的敏感起爆药或斯蒂酚酸铅为主的点火药。

电热火工品的作用机理和装药类型决定了它可低能量发火, 但易受电磁信号干扰。早在 20 世纪 50 年代, 美国杜邦公司就指出电爆管有可能由于暴露在电磁场中而发生误引爆, 并开始了“HERO (Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance)”方面的研究, 该问题的核心是射频对电爆装置的危害<sup>[1]</sup>。自 20 世纪 60 年代以来, 关于电磁环境对电热火工品的危害, 国外开展了大量的基础研究, 并制定了相应标准, 如美军标 MIL-STD-1901《弹药火箭和导弹发动机点火系统安全性设计准则》明确要求点火系统在正常寿命周期内, 暴露于电磁辐射、静电放电、电磁脉冲、电磁干扰、雷电作用和电源瞬变等 6 种电磁环境之后, 不发生意外的解除保险或作用<sup>[2]</sup>。国内也曾发生多起因火工品在电磁环境下意外发火造成的重大事故, 如 1984 年云南前线的猫耳洞内 3 发某型号火箭弹由于闪电电磁波作用, 造成意外发火<sup>[3]</sup>。2005 年 5 月我国南方某城市某型号火工品存放在有防护的库房中, 由于雷

电导致爆炸等。因此, 国内对电热火工品的防静电、防射频技术进行了大量研究, 并根据美军标建立了系列的武器系统或分系统的电磁环境试验方法与相关标准。

电热火工品作为武器系统大量采用的始发单元, 其电磁环境下的安全性与适应能力将直接影响武器系统的整体安全性。目前, 国内对电热火工品电磁危害的分析与评估大多为定性研究, 缺乏系统的定量评估方法和测试手段<sup>[4-6]</sup>, 因此, 具有一定的局限性。随着电磁环境测试手段的发展与完善, 使得量化研究电热火工品电磁环境中的响应成为可能。本研究针对电热火工品连续电磁波辐射环境下的响应效应, 在理论分析的基础上, 采用电磁环境模拟手段与表征方法, 通过改变典型的试验状态、系统, 测试了电热火工品在连续电磁波辐射下的响应规律与特性, 为电热火工品抗电磁波环境加固设计提供支持。

### 2 电热火工品电磁波环境下的简化模型

研究电热火工品电磁波环境下的作用机理, 需要对电热火工品元器件、装配状态及性能的比较分析, 确定受电磁波环境影响较为突出的主要特征参数。在特定电磁波环境下, 电热火工品的发火线路可以看作是一个细的线状天线, 它能接收电磁波能量并将能量传输于桥丝换能元, 产生感应电压或电流。为了便于定性分析, 具体建立了图 1 所示的理想状态下, 电磁波环境对电热火工品影响的简化作用模型及等效电路<sup>[7]</sup>。图 1 中电热火工品引线垂直于导电地平面, 入射电磁场  $E$  为均匀平面波并与引线方向平行。

收稿日期: 2011-10-25; 修回日期: 2011-12-20

作者简介: 王可暄(1977-), 男, 从事高新火工品相关研究。

通讯联系人: 任炜(1982-), 男, 硕士, 从事高新火工品相关研究。

e-mail: rw0192@163.com

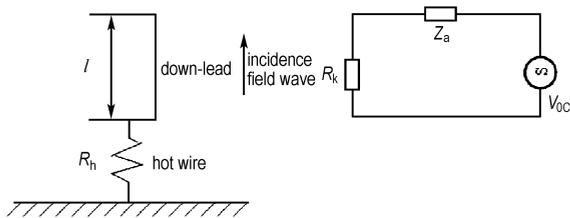


图1 电热火工品电磁波环境下的简化模型

Fig. 1 The elementary model of EED in electromagnetic environment

根据麦克斯韦方程,电磁波在电热火工品换能元两端感应的开路电压  $V_{0c}$  为:

$$V_{0c} = El \quad (1)$$

式中,  $E$  为电场强度;  $l$  为桥丝换能元引线长度。

利用等效电路计算流过桥丝换能元的电流(感应电流)  $I$  为:

$$I = \frac{V_{0c}}{Z_a + R_h} = \frac{El}{Z_a + R_h} \quad (2)$$

式中,  $Z_a$  为等效天线阻抗,  $R_h$  为桥丝换能元电阻。

假设电热火工品的最大不发火电流是  $I_{MNF}$ , 则相应的最大不发火场强  $E_{MNF}$  是:

$$E_{MNF} = \frac{I_{MNF}}{l} (Z_a + R_h) \quad (3)$$

从式(3)可知,电热火工品的最大不发火场强与电热火工品的引线长度、等效天线阻抗、换能元电阻及最大不发火电流有关。

### 3 电热火工品电磁辐射试验原理与方法

电磁波环境对电热火工品形成电磁危害的方式有传导和辐射两种,其中传导是沿着辐射源和电热火工品间的连接电路传递到电热火工品中,辐射是以电磁波的形式耦合到电热火工品上。本研究利用图2所示的电磁辐射试验原理,探讨电热火工品在连续电磁波辐射环境下的响应规律。试件装配图及测试系统外形图如图3和图4所示。

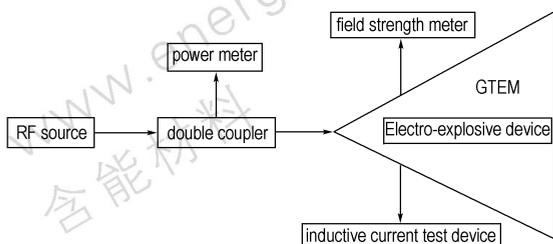


图2 电热火工品电磁辐射试验原理

Fig. 2 The principle of electromagnetic radiation experiment

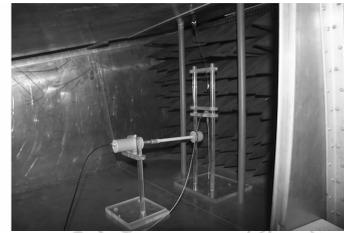


图3 电热火工品电磁辐射试验试件装配图

Fig. 3 Assembly of EED in the GTEM



图4 电磁辐射测试系统外形图

Fig. 4 The electromagnetic radiation experiment system

### 4 电热火工品电磁波环境下的简化模型

根据简化模型得到的理论公式(3)知,电热火工品的最大不发火场强与电热火工品的引线长度、等效天线阻抗、换能元电阻及最大不发火电流有关。其中,等效天线阻抗  $Z_a$  是与频率有关的参数,因此,在试件其它条件相同的情况下,通过改变入射电磁波的频率来研究阻抗对电热火工品的影响规律。采用电磁辐射功率注入的方法,通过电流环测试感应电流,研究连续电磁波辐射环境下不同电场强度、不同频率、不同引线长度与不同阻值对电热火工品感应电流变化的影响规律。

#### 4.1 电热火工品在不同强度连续电磁波下的响应规律

首先在试件引线长度一定,电阻不变的情况下进行试验,采用典型低发火能量电热火工品12号电发火管,发现试件在感应电流接近50 mA的时候就有1发发火。具体试验中要选择装配条件一致的试件存在一定的难度,为了确保试件条件的一致性,尽量避免火工品装配条件或意外发火等带来的数据失真等影响,本研究以火工品换能元为测试样品,分别在120, 160, 200, 240, 280, 320, 360 MHz频率点进行了试验,各固定频率不同场强条件下的感应电流测试结果见表1。与低发火能量电热火工品安全电流参数值比较可知,低发火能量电热火工品的安全电流在几十毫安左右,通电时间一般为1~3 min<sup>[8]</sup>。表1中200 MHz电磁波辐射环境下的感应电流最大值约为0.16 A,已超过大部分低发火能量电热火工品的安全电流,可能引起产品意外发火。

从表 1 选择 120, 200, 280 MHz 3 个典型频率点的试验数据进行分析, 得到场强与感应电流之间关系曲线见图 5。从图 5 可见, 电热火工品在连续电磁波辐射下的感应电流与场强成正比, 随着场强的增加几乎呈线性增加。但在不同的频率点感应电流变化规律存在着较大的差异, 可见频率也是影响感应电流的一项重要参数, 下面重点研究电磁波频率对感应电流的影响。

表 1 电热火工品不同频率不同场强连续电磁波辐射下的感应电流  
Table 1 Inductive currents in different frequencies and intensity continuant electromagnetic environment mA

frequency / MHz	$E / V \cdot m^{-1}$				
	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

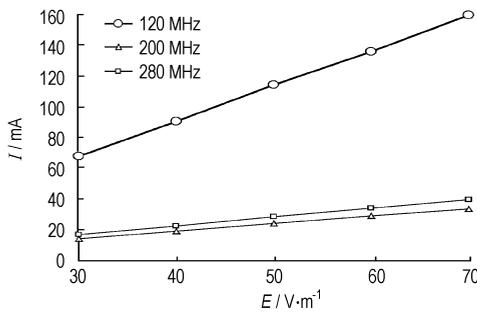


图 5 不同场强对火工品感应电流的影响  
Fig. 5 The influence of different intensities on inductive current

4.2 电热火工品在不同频率连续电磁波下的响应规律

根据表 1, 选择相同条件下的数值得到电磁波不同频率对火工品感应电流的影响规律如图 6 所示。从图 6 可见, 电热火工品在连续电磁波辐射下的感应电流随着频率变化发生明显变化, 且在某一频率点附近出现感应电流与频率之间存在谐振特性, 如 200 MHz 附近感应电流约比 150 MHz 以下和 280 MHz 以上频率下的感应电流大 4 倍, 这表明试件最大感应电流与谐振频率有关。

根据天线理论中的弗里斯传输方程可知, 谐振频率与电热火工品的引线长度有关, 并按公式(4)计算<sup>[8]</sup>:

$$f_{max} = (2n - 1) \frac{150}{l} (\text{MHz}) \quad (n = 1, 2, 3) \quad (4)$$

本组试验数据所用试件在 GTEM (Giga transverse electromagnetic cell) 传输装置内的放置状态如图 7

所示, 其双引线长度 0.72 m, 根据公式(4), 计算得到谐振频率约为 208.3 MHz。结合试验数据及图 6 的关系曲线可知, 感应电流在谐振频率点最大, 随着频率逐渐偏离谐振频率点, 频率对感应电流的影响逐渐消失。

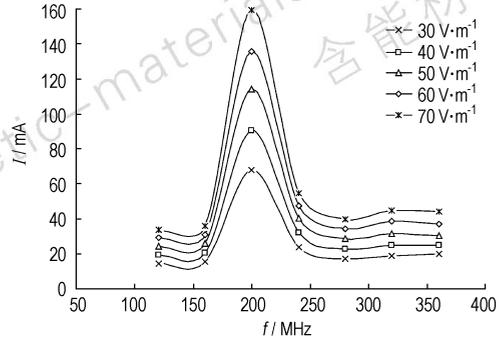


图 6 不同频率对火工品感应电流的影响  
Fig. 6 The influence of different frequencies on inductive current

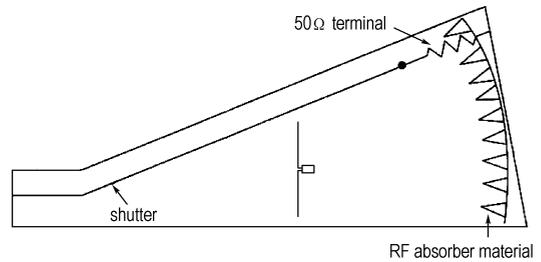


图 7 火工品脚线在 GTEM 传输装置内的放置状态  
Fig. 7 Placement of EED in the GTEM

4.3 电热火工品不同引线长度在连续电磁波下的响应规律

为了进一步验证频率与引线长度之间的关系, 在相同频率, 电阻不变的情况下, 改变试件引线长度进行试验。图 8 是在 200 MHz 频率点, 不同引线长度的试件在场强分别为 30, 40, 50, 60, 70 V · m<sup>-1</sup> 的感应电流变化曲线。图 8 表明, 随着引线 (l) 长度的增加, 感应电流 (I) 随之增加。

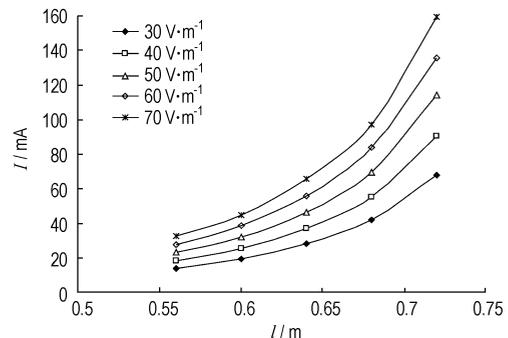


图 8 不同引线长度对火工品感应电流的影响  
Fig. 8 The influence of down-leads length on inductive current

#### 4.4 电热火工品不同阻值在连续电磁波下的响应规律

电热火工品换能元的电阻值是影响其发火性能的一项重要设计参数。一般情况下,低发火能量电热火工品与钝感型电热火工品除了装药的差别之外,低发火能量电热火工品的电阻值较大,而钝感型电热火工品的电阻值较小。因此,在相同频率和试件引线长度,保持场强不变的情况下,改变试件电阻值进行试验。

根据 3.2 节的试验与分析结果可知,试件在谐振频率点的感应电流最大,因此,对照本次试验所用试件的双引线长度(0.5 m),试验频率选择 300 MHz,场强采用  $150 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ,初步得到换能元电阻与感应电流之间的试验数据,见表 2。从表 2 可知,在同一频率和相同场强条件下,随着换能元电阻值的增大,感应电流随之变小,与理论分析得到的规律一致。

表 2 换能元电阻对火工品感应电流的影响

Table 2 The influence of different resistances on inductive current

$R/\Omega$	1.5	1.9	3.7	6.6	7.5	8.2	9.9
$I/\text{mA}$	419.8	365.6	96.2 <sup>1)</sup>	54.1 <sup>1)</sup>	31.1 <sup>1)</sup>	23.7	19.4

Note: 1) hot wire fused by the inductive current.

## 5 结 论

采用电磁辐射模拟试验系统,较为系统地完成了电热火工品在不同场强、频率连续辐射下,以及火工品引线长度及阻抗等参数条件下的感应电流的理论分析与定量测试,结果表明:

(1) 电热火工品连续电磁波辐射环境下感应电流响应规律的理论分析和试验结果一致。

(2) 电磁波环境参数中的场强和频率对电热火工品的响应有明显影响。感应电流的变化与场强成正比;频率对感应电流的影响与电热火工品的引线(接

收天线)长度密切相关,特别是当引线长度与频率呈谐振状态时感应电流最大,可见不同的装配结构会使电热火工品电磁波环境下安全性截然不同。在电热火工品设计与使用过程中,应分析其可能经受的电磁波频率范围,使电热火工品的装配等效引线长度的谐振频率尽可能的远离其所经受的频率范围,可极大地降低电热火工品的电磁辐射环境下的危害电流。

(3) 换能元电阻对电热火工品响应的影响,由于电热火工品换能元电阻值的设计主要通过改变材料、形状和尺寸等参数实现,而上述参数对试验结果的影响也很大,导致目前得到的影响规律仅是一种趋势,尚需大量研究工作与深入探索。

致谢:本文电磁辐射模拟试验由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电磁环境课题组承担完成,试件由陕西应用物理化学研究所第十研究室提供。在此,对他们的支持表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] Willie R C Bogan. Comparasion of EMP and HERO Programs[R]. Naval Postgraduates School,1988.
- [2] MIL-STD-1901, 弹药火箭和导弹发动机点火系统安全性设计准则[S]. 1992.
- [3] 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.
- [4] 李锦荣. 电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]. *Initiators & Pyrotechnics*,1992(4): 24-31.
- [5] GJB786-1989,预防电磁场对军械危害的一般要求[S]. 1990.
- [6] 景晓强,马宏萱,王海. 电火工品电磁危害评估[J]. 火工品,1999(4): 44-47.  
JING Xiao-qiang, MA Hong-xuan, WANG Hai. Evaluation of electromagnetic hazards to EED[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1999(4): 44-47.
- [7] 艾鲁群. 国外火工品手册(药剂和试验)[M]. 1988.
- [8] 火工品产品手册[M]. 西安:中国兵器工业第二一三研究所,1999.

## Response Rule of Hot-wire EED in Continuous Electromagnetic Environment

WANG Ke-xuan, BAI Ying-wei, REN Wei, CHENG Jia-qi

(Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physical Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** In order to investigate the hot-wire EED's (Electro-explosive device) response rules in continuant electromagnetic environment and to provide the theoretic support for hot-wire EED's anti-electromagnetic reinforcing design, an elementary model was founded. Base on the elementary model, the important parameters and electromagnetic radiation experiments were studied, which consist with the elementary model and theory formula.

**Key words:** electromagnetics; hot-wire EED; electromagnetic environment; inductive current

CLC number: TJ45; O44

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.05.020