

文章编号: 1003-1480(2022)02-0035-04

# 基于大电流注入法的火工品高场强 电磁辐射效应等效测试

纪向飞, 姚洪志, 陈建华, 赵 团, 任 炜

(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:** 针对火工品高场强电磁辐射效应考核缺乏试验手段的问题, 开展了基于大电流注入法的低频段高场强电磁辐射效应等效测试方法研究, 完成等效方法设计。通过辐射效应试验获得耦合规律及辐射场强与火工品响应耦合函数; 搭建电磁耦合钳注入试验系统, 获得了注入传导耦合规律, 建立注入功率与火工品响应关系函数; 以火工品的响应参数为中间量, 推导建立了辐射场强和注入功率的耦合传递函数, 从而在低频段利用注入方法实现对火工品的高场强电磁辐射等效考核。

**关键词:** 电火工品; 高场强电磁辐射; 注入试验; 等效测试

中图分类号: TJ450.6 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.02.008

## Equivalent Test of High-field Electromagnetic Radiation of EED Based on Bulk Current Injection

JI Xiang-fei, YAO Hong-zhi, CHEN Jian-hua, ZHAO Tuan, REN Wei

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

**Abstract:** The equivalent test method of low frequency high-field electromagnetic radiation (HEMR) based on bulk current injection was studied for the need of HEMR effect test on EED, and the equivalent test method design was completed. Through the radiation effect experiment and electromagnetic coupling forceps injection experiment research, and by the response function of EED as the middle volume, the coupling transfer function between radiation field strength and injection power was established, so the HEMR equivalent test on EED was achieved in the low frequency range.

**Key words:** EED; High-field electromagnetic radiation; Injection experiment; Equivalent test

随着武器系统的现代化, 微电子技术、计算机技术和电火工品广泛应用于各种高新技术武器装备, 使得武器装备的电磁敏感度大大提高<sup>[1]</sup>。高技术条件下的战场电磁环境促使各国加强对电磁环境敏感系统的研究, 尤其是开展武器装备电磁环境效应研究, 以提升其抗电磁环境能力<sup>[2]</sup>。火工系统是武器系统中最危险、最敏感的部分, 其安全性与可靠性直接关系到整体系统的安全性<sup>[3-4]</sup>, 因此, 研究武器系统

及火工品的高场强电磁辐射等效测试技术, 对武器系统进行辐射效应考核, 是高新技术武器装备发展中的重要课题<sup>[5]</sup>。

目前, 国内外一般在电波暗室中模拟电磁环境进行电磁兼容性试验研究, 受放大器功率和发射天线增益的限制, 产生的辐射场强一般在 200V/m 以下<sup>[6]</sup>, 传统的电磁辐射敏感度试验方法已经难以满足装备电磁环境效应测试的要求。要解决武器系统的高场强

收稿日期: 2021-06-15

作者简介: 纪向飞 (1982-), 男, 高级工程师, 从事火工品电磁效应试验与评估技术研究。

辐射效应试验问题，一方面可研制大功率的放大器；另一方面就是研究高场强等效测试方法。基于此，发展了电流注入试验方法，其实质是把高场强辐射敏感度试验采用电流传导敏感度试验来替代<sup>[7]</sup>。本文依据大电流注入（Bulk Current Injection, BCI）试验方法，开展了1~400MHz频率范围内电火工品高场强电磁辐射等效测试方法研究。

## 1 高场强电磁辐射等效试验方法设计

要实现电火工品的高场强辐射效应等效测试，需要建立辐射与传导试验的耦合传递函数<sup>[8]</sup>，计算高场强对应的注入功率，完成等效注入试验。具体流程包括：（1）建立辐射效应耦合函数。对电火工品在低场强电磁辐射环境中进行辐射效应试验，获得辐射效应试验规律，建立辐射场强与火工品响应关系函数；（2）建立注入传导函数。基于电流注入法，结合电火工品的引线结构特点，开展电火工品传导注入试验研究，获得传导试验规律，建立注入功率与火工品响应关系函数；（3）建立耦合传递函数。利用辐射效应耦合函数和注入传导函数，以火工品的响应水平为中间量，分析计算辐射场强和注入功率的耦合传递函数；（4）高场强计算与等效试验。计算高场强电磁辐射对应的注入功率，对电火工品进行注入等效试验，获得火工品在此条件下的响应情况，实现对电火工品的高场强电磁辐射效应的有效考核。

在高场强电磁辐射等效试验方法设计中，理论上每种状态下的辐射效应试验均可对应于一定状态的注入传导试验，但由于放大器、耦合钳等设备功率的限制，实际等效试验实施过程中，在辐射效应试验状态确定的情况下，应尽可能地寻找注入传导试验中火工品响应最大的状态，以实现低功率注入与高场强辐射的等效。本研究辐射效应试验采用偶极天线模式，注入传导试验寻找相对效率较高的状态进行试验。

## 2 辐射效应耦合函数建立

选取3类典型火工品：某电点火管、半导体桥

（SCB）换能元、爆炸箔换能元，电阻依次为4Ω、1.5Ω、35mΩ，设置信号频率250MHz，将火工品脚线展开成偶极天线，脚线展开长度为20cm，放置在GTEM小室内，利用电火工品电磁辐射敏感度试验系统<sup>[9]</sup>，依次施加40V/m、60V/m、80V/m、100V/m、130V/m辐射场强，研究火工品换能元的感应电流规律。试验状态布局示意图如图1所示。3种火工品实物图如图2所示。

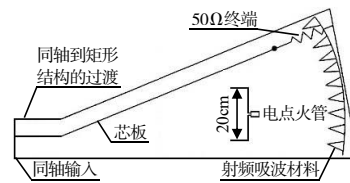


图1 某电点火管辐射效应试验布局图

Fig.1 Radiation effect test layout on some electric igniter



(a) 电点火管 (b) 半导体桥换能元 (c) 爆炸箔换能元

图2 3种火工品实物图

Fig.2 Three kinds of pyrotechnic explosive device photo

辐射效应试验感应电流数据见表1，偶极模式下感应电流与辐射场强关系曲线如图3所示。由图3可见，感应电流随辐射场强的增加呈线性增大，二者成正比关系，耦合函数为 $I=0.11796E$ ，其中 $I$ 为感应电流幅度（单位mA）， $E$ 为辐射场强（单位V/m）。上述3种火工品电阻不同，状态相同，感应电流大小和趋势完全相同，说明在辐射场对电火工品的耦合作用中，耦合效应主要受脚线状态和脚线长度影响，火工品电阻基本没有影响。

表1 辐射效应试验感应电流数据 (mA)

辐射场强/(V·m <sup>-1</sup> )	40	60	80	100	130
电点火管	4.55	6.97	9.29	11.70	15.60
SCB换能元	4.66	7.05	9.51	11.97	15.78
爆炸箔换能元	4.60	6.89	9.40	11.70	15.60

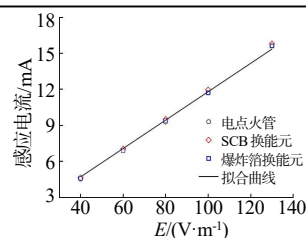


图3 感应电流与辐射场强拟合曲线

Fig.3 Relation between induced current and radiation field

### 3 注入传导函数建立

#### 3.1 电磁耦合钳注入试验系统及等效性分析

电火工品电磁耦合钳注入系统主要包括信号源、放大器、双定向耦合器、注入耦合钳、测试接收机、监测探头等设备。其原理是利用注入耦合钳，将射频能量耦合进电火工品换能元上，利用监测探头监测电火工品上的感应电流，观察不同功率注入水平对电火工品造成的效应。系统原理如图4所示。

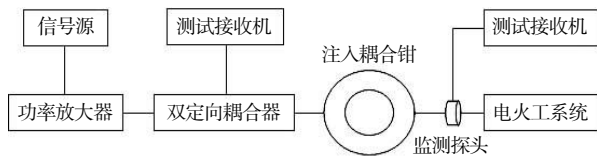


图4 电磁耦合钳功率注入系统原理框图

Fig.4 Principle block diagram of electromagnetic coupling forceps power injection system

在250MHz信号注入试验中火工品在偶极天线、环形天线等模式下的感应电流均为正弦波，感应电流频率均为250MHz，与火工品在250MHz辐射场中的感应电流波形一致，说明辐射和传导注入试验对电火工品造成的效应相同，辐射效应可利用注入传导试验等效代替。

#### 3.2 注入传导函数建立

在频率250MHz注入信号作用下，以偶极电线模式，分析不同引线长度、不同注入功率下火工品的效应情况，试验数据如表2所示。不同注入功率下感应电流与引线长度的关系如图5所示。

表2 不同引线长度注入的感应电流 (mA)

Tab.2 Induced current of injection experiment for different lead lengths

引线长度/cm	注入功率/W				
	10	20	30	40	50
15	2.71	3.30	4.66	5.73	6.00
30	18.97	27.11	32.59	37.85	42.47
45	74.65	107.91	129.73	148.95	167.13
50	126.78	177.03	215.30	250.06	280.58
55	112.99	157.78	191.89	222.87	250.06
60	64.28	90.79	111.70	128.25	143.90
75	32.59	46.56	57.29	65.77	73.80
90	20.80	29.38	36.15	41.98	47.10

由表2、图5可见，同一注入功率水平下，250MHz注入信号在引线长度50cm（略小于250MHz对应的谐振长度60cm）时感应电流最大、效率最高。因此

选取引线长度50cm数据进行数据拟合，获得感应电流与注入功率关系，见图6。由图6可以看出感应电流*I*与注入功率*P*呈指数关系：

$$I=kP^{0.5} \quad (1)$$

式(1)中：*k*为系数，与引线长度有关；*I*为感应电流值，mA；*P*为注入功率值，W。

上述状态对应的注入传导函数为： $I=39.58254P^{0.5}$ 。

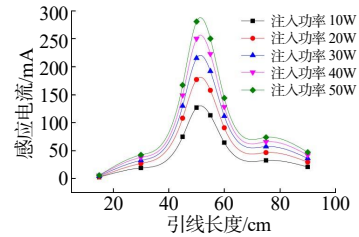


图5 引线长度与感应电流关系

Fig.5 Relation between lead length and induced current

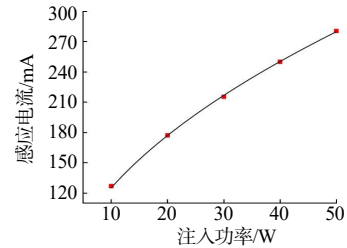


图6 感应电流与注入功率拟合关系

Fig.6 Relation between induced current and injection power

### 4 耦合传递函数建立及等效试验

#### 4.1 辐射和传导耦合传递函数建立

利用辐射效应试验建立了250MHz辐射场强与感应电流的耦合函数： $I=0.11796E$ ，利用电磁耦合钳注入试验建立了感应电流和注入功率的注入传导函数： $I=39.58254P^{0.5}$ 。以火工品的感应电流为中间量，分析计算辐射场强和注入功率的耦合传递函数为 $P=8.881 \times 10^{-6}E^2$ 。利用上述方法可建立1~400MHz内任意频率的耦合传递函数。

#### 4.2 注入等效试验

根据建立的耦合传递函数可以计算高场强辐射场对应的注入功率，利用耦合钳传导注入试验系统给电火工品注入计算的功率能量，使其在电火工品上产生辐射场作用下相同的感应电流值，从而实现电火工品电磁辐射高场强等效测试。辐射场强与注入功率对

应关系的计算结果见表3。

由表3可知,250MHz电磁辐射环境下辐射场强1000V/m时的感应电流约为118mA,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或对其造成危害。

表3 辐射场强与注入功率对应关系计算结果

Tab.3 Calculation results between radiation field strength and injection power

辐射场强/(V·m <sup>-1</sup> )	感应电流/mA	注入功率/W	备注
200	23.59	0.36	
500	58.98	2.22	
1000	117.96	8.88	电点火管 A50%发火电流 85mA
2000	235.92	35.52	电点火管 B50%发火电流 285mA
3000	353.88	79.93	
5000	589.80	222.00	
6711	792.00	400.00	

利用2种电点火管A、B在250MHz进行注入试验,试验结果见表4。

表4 250MHz高场强等效注入试验数据

Tab.4 Data of 250MHz equivalent injection test

注入功率/W	等效辐射场强/(V·m <sup>-1</sup> )	感应电流/mA	产品	序号	试验情况	备注
8.88	1000	117.96	电点火管 A	1 <sup>#</sup>	发火	50%发火
				2 <sup>#</sup>	发火	电流
				3 <sup>#</sup>	发火	85mA
79.93	3000	353.88	电点火管 B	1 <sup>#</sup>	发火	50%发火
				2 <sup>#</sup>	发火	电流
				3 <sup>#</sup>	发火	285mA

由表4可见,当注入功率8.88W时,在电点火管A上产生117.96mA的感应电流,大于电点火管A的50%直流发火电流,导致3发电点火管A全部发火,说明在250MHz连续波作用下,1000V/m的辐射场强能够造成电点火管A(引线展开20cm)发火;同理,注入功率79.93W等效于250MHz、3000V/m的辐射场作用,该功率导致3发电点火管B(引线展开20cm)发火。试验表明利用电磁耦合钳注入试验能够完成对电火工品高辐射场强的等效测试。

## 5 结论

本研究开展了基于大电流注入法的低频段高场强电磁辐射效应等效测试方法研究,完成等效方法设计,建立辐射与传导试验的等效传递关系,实现了对电火工品的高场强等效试验。主要获得以下结论:

(1)通过等效性分析,辐射与传导注入试验在火工品上产生的电流波形相同,认为辐射和传导注入可对电火工品造成相同的效应,利用传导注入试验可等效替代辐射效应试验。

(2)通过辐射效应试验可获得辐射场强与电火工品响应的耦合关系函数;通过注入传导试验可建立注入功率与火工品响应的关系函数;以在火工品上产生相同的响应水平为中间量,推导辐射与注入试验的等效传递关系,计算一定辐射场强对应的注入功率,进行等效注入试验。

(3)通过2种电点火管在250MHz下进行等效注入试验,说明利用电磁耦合钳注入传导试验能够替代高场强辐射效应试验,可实现对电火工品高场强辐射效应的等效测试。

## 参考文献:

- [1] 周璧华,陈彬,高成.现代战争面临的高功率电磁环境分析[J].微波学报,2002,18(1):88-92.
- [2] 刘尚合,孙国至.复杂电磁环境内涵及效应分析[J].装备指挥技术学院学报,2008,19(1):1-5.
- [3] 魏光辉,国海广,孙永卫.电火工品静电安全性评价方法研究[J].火工品,2005(2):21-24.
- [4] 封青梅,赵团,李锦荣.电火工系统抗辐射模拟试验标准分析研究[J].国防技术基础,2006(8):3-7.
- [5] 洪家财,侯孝民.美军电磁环境效应研究启示[J].装备指挥技术学院学报,2009,20(3):10-13.
- [6] 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].国防科学技术工业委员会,2013.
- [7] 徐加征,蒋全兴,王巍.直接电流注入技术对高场强辐射场的模拟与实践[J].微波学报,2005,21(增刊):24-27.
- [8] 魏光辉,潘晓东,卢新福.注入与辐照相结合的电磁辐射安全裕度试验方法[J].高压技术,2012,38(9):2213-2220.
- [9] 王可暄,白颖伟,任炜.电热火工品连续电磁波环境下响应规律[J].含能材料,2012,20(5):610-613.