

文章编号:1006-9941(2024)01-0076-07

## 电火工品的电磁场安全阈值

姚洪志<sup>1,2</sup>,章云<sup>1</sup>,杜敬利<sup>1</sup>,赵团<sup>2</sup>,纪向飞<sup>2</sup>,赵甲<sup>2</sup>,李瑞<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学机电工程学院,陕西 西安 710061; 2. 陕西应用物理化学研究所应用物理化学国家重点实验室,陕西 西安 710061)

**摘要:** 为探索电火工品电磁场安全阈值,为电火工品电磁兼容和电磁环境效应研究提供敏感度评价基准,以电火工品电磁-热耦合模型为基础,采用白光干涉法测试了14号电火工品电磁场响应特征,研究了电火工品电磁场耦合、自身敏感性以及电磁响应三者之间的效应关系,形成了电火工品电磁场安全阈值的试验方法和计算方法,获得了10 kHz~18 GHz频率范围内14号电火工品电磁场安全阈值。结果表明14号电火工品的敏感频率范围为40 MHz~1 GHz。

**关键词:** 电火工品;电磁场;耦合模型;白光干涉;安全阈值

中图分类号:TJ55;O64

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2022296

### 0 引言

电火工品易受电磁波影响会发生失效、意外作用等<sup>[1]</sup>,因此电火工品的电磁兼容设计、抗电磁干扰能力的提升,成为火工品行业的核心关键问题。M. R. Biswal等<sup>[2]</sup>在电磁兼容暗室内利用宽带天线分析了电火工品的射频敏感度,依据电火工品自身敏感性获得了宽频带环境下电火工品敏感度特性;陈亚洲等<sup>[3-4]</sup>在数值计算和仿真基础上,评估了桥丝式电火工品的雷电电磁脉冲安全性;同红海等<sup>[5]</sup>利用吉赫兹横电磁波传输室研究了爆炸箔的高空电磁脉冲发火阈值,获得了爆炸箔火工品电磁脉冲作用概率分布;魏光辉等<sup>[6]</sup>研究了窄带电磁辐射引信不同状态的耦合特性,获得了窄带电磁辐射环境中引信起爆规律。赵团等<sup>[7]</sup>表征了电火工品结构对电磁波的传导、辐射耦合规律以及电火工品电磁场感应能量,基于红外比色方法定量研究了火工品电磁环境中感应能量的高精度测量。除此,学者们还围绕着基础理论、测量方法、参数表征开展了

一系列的电火工品的电磁兼容研究,包括依据天线理论构建电火工品电磁场分析模型,通过电热换能原理探索电火工品感应能量定量表征方法,利用电火工品结构参数分析其接收电磁能量的影响因素等<sup>[8-12]</sup>。

综上所述,最为关键的电火工品电磁兼容性评价基准方面还一直存在空白,无法类比其他军用系统或者分系统具备电磁发射基准,这导致电火工品电磁兼容性评价无据可依,严重减缓了研究进程。基于此,本研究从电火工品电磁场中的电热耦合模型入手,分析外界电磁环境与电火工品的耦合规律,以电火工品自敏感性数据为基础,探索了电火工品电磁场安全阈值,为火工品电磁兼容性研究提供相关参考。

### 1 电磁-热耦合模型

#### 1.1 模型的建立

电火工品是电热换能元件,受电磁干扰的过程最终表现为电能到热能再到化学能的转换过程。电火工品引线作为天线,在环境电磁场中拾取电磁能量,这些能量通过电火工品电极塞传导耦合至桥丝,产生焦耳热,热量足够大时引发电火工品的功能失效或者意外作用(图1)。通过向电火工品引线两端馈入电磁功率产生桥丝的热分布红外成像图<sup>[14]</sup>,可直接监测到电火工品换能元的热响应(图2)。但电磁波频谱范围较宽,不同频率电磁波也因此电火工品上产生的热效

收稿日期:2022-12-14;修回日期:2023-03-30

网络出版日期:2023-11-03

作者简介:姚洪志(1982-),男,研究员,主要从事火工品电磁兼容研究。e-mail:yhz305@163.com

通信联系人:章云(1983-),男,副教授,博导,主要从事装备精度测试与分析、智能传感与微执行器、新能源技术研究。

e-mail:yunzhang@xidian.edu.cn

引用本文:姚洪志,章云,杜敬利,等.电火工品的电磁场安全阈值[J].含能材料,2024,32(1):76-82.

YAO Hong-zhi, ZHANG Yun, DU Jing-li, et al. Electromagnetic Field Safety Threshold of Electro-explosive Devices[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(1):76-82.

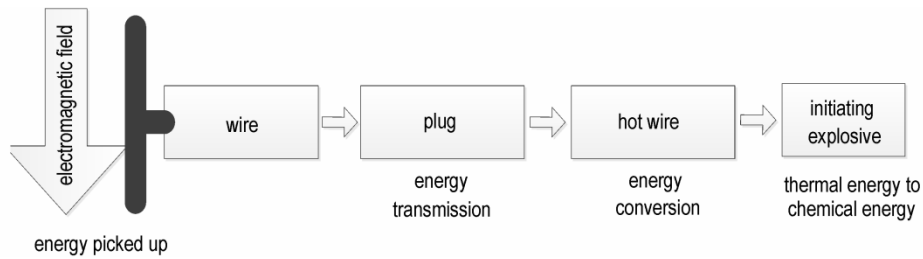


图1 电磁波对电火工品耦合示意图

Fig.1 Schematic diagram of coupling of electromagnetic wave to EEDs

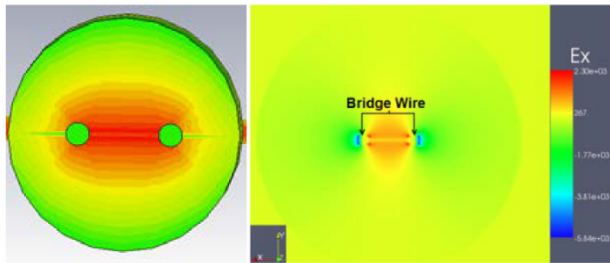


图2 电火工品桥丝热分布(红外图像)

Fig.2 Thermal distribution of the bridge wire of EEDs

应情况会有所差异。

根据能量守恒定律,桥丝界面的能量输入和能量散失会引起桥丝温度的变化,计算式如式(1)所示<sup>[15]</sup>:

$$\frac{dQ_i}{dt} - \frac{dQ_o}{dt} = \rho V C_p \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

式中,  $Q_i$  为桥丝获得的能量, J;  $Q_o$  为桥丝向周边散失能量, J;  $\rho$  为桥丝的材料密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $V$  为桥丝体积,  $\text{m}^3$ ;  $C_p$  为桥丝材料比热容,  $\text{J} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $T$  为桥丝温升,  $^{\circ}\text{C}$ 。

完整的热传递方程式(1)较为复杂。依据电火工品电磁场中响应特性的研究基础可做简化处理,过程中忽略药剂作用前的化学反应<sup>[16]</sup>。通过分析和实践,对电火工品桥丝电磁场中感应能量的测量,可借助桥丝温度响应作为中间变量进行分析研究,如式(2)所示:

$$C \frac{d\Delta T}{dt} = P - \frac{1}{R_T} \cdot \Delta T \quad (2)$$

式中,  $C$  为桥丝热容,  $\text{J} \cdot \text{C}^{-1}$ ;  $R_T$  为桥丝热阻,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ ;  $\Delta T$  为桥丝温升,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $P$  为桥丝接收的电功率,  $\text{W}$ 。

令  $\tau = C \cdot R_T$ , 则式(2)简化后如式(3)所示:

$$C \frac{d\Delta T}{dt} + \frac{C}{\tau} \Delta T = P \quad (3)$$

求解式(3)得到式(4):

$$\Delta T = P \cdot \frac{\tau}{C} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (4)$$

式中,  $\tau$  为电火工品热时间常数, s。由式(4)可得,电火工品桥丝温升与桥丝接收的电功率、其热时间常数有关。

图3为14号电火工品短引线状态,当电磁波通过电火工品引线两端馈入时,温度会在较短时间内达到热平衡状态,此时在感应电磁能量与桥丝向环境散发的热量维持平衡<sup>[17]</sup>,桥丝上的温度响应除与感应电功率相关外,还与电火工品散热系数、桥丝热容、以及热时间常数有关,14号电火工品相关参数如表1所示。

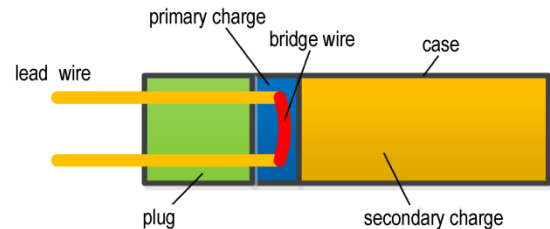


图3 14号电火工品结构示意图

Fig.3 Structure diagram of No.14 EED

表1 14号电火工品热参数

Table 1 Thermal parameters of No.14 EED

parameters	value
heat capacity of hot wire / $\mu\text{J} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	40
thermal resistance / $^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$	1250
thermal time constant / ms	10

当电火工品短引线状态(图4)时,根据表1和式(4)模拟得到不同频率、相同功率馈入条件桥丝温升的对应数据,结果见表2,计算结果显示从馈入端加载的电功率为10 mW,随着频率变换,导致了到达桥丝端面的功率差异很大。短引线状态下、在电磁波的传递过程中,阻抗不连续会导致不同的介质端面形成驻波,因此,从端面  $z=0$  处馈入的电磁波不能够完全转化成桥丝热效应。

因此,电火工品在电磁场中接收电磁能量并传递至桥丝的过程是,电火工品脚线等效成天线的结构从电磁场中拾取能量,后经电极塞传递能量至桥丝(这个过程往往是以前研究中容易忽视的部分),而后能量达到桥丝,桥丝趋肤效应的存在使得一部分能量形成有

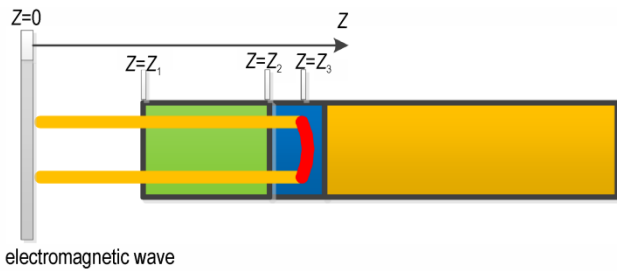


图4 电磁波电极塞中传导示意图

Fig.4 Schematic diagram of conduction of electromagnetic wave in plug

表2 消耗功率与温升的对应关系

Table 2 Correspondence between power consumption and temperature rise

frequency / GHz	feed in power / mW	temperature rise / °C
1.033	10	0.5
2.115	10	12.5
5.813	10	12.5
12.56	10	2.9

功率转化为热能,进而转化为温升,温升可由式(4)计算获得,具体的传输耦合计算方法请参照文献<sup>[11]</sup>。

## 1.2 模型验证

为验证电火工品电磁-热耦合模型,研究采用电磁传导实验对电火工品(图5)进行了电火工品桥丝热响应测试。

样品为14号电火工品。

实验装置包括信号源、功率放大器、双定向耦合器、功率计、阻抗匹配装置、温度传感器等组成测试系统,该系统可产生频率10 kHz~18 GHz、功率0~25 W电磁特征,具体配置如图5所示。

实验采用电磁传导方式,最后得到了典型频率、固定功率10 mW条件下的温度响应结果,将测量结果表3与模型计算结果表2对比得到(表4)。由表4可以看出,模型计算结果的误差为1.44%~14%,可见,电火工品电磁场电热响应模型的构建基本准确。

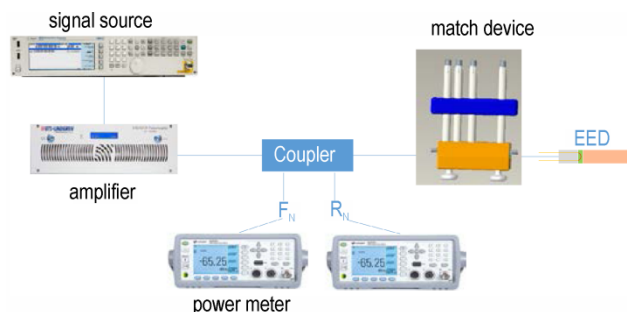


图5 电磁传导实验配置图

Fig.5 Electromagnetic conduction test configuration

表3 消耗功率与温升的对应关系

Table 3 Correspondence between power consumption and temperature rise

frequency / GHz	feed in power / mW	temperature rise / °C
1.033	10	0.57
2.115	10	12.76
5.813	10	12.68
12.56	10	3.14

表4 测量结果与模型计算结果比对

Table 4 Comparison of measured results with calculated

frequency / GHz	measured temperature / °C	calculated temperature / °C	error / %
1.033	0.57	0.5	14.00
2.115	12.76	12.5	2.08
5.813	12.68	12.5	1.44
12.56	3.14	2.9	8.28

由表2和表3可以看出,只有当电火工品短引线状态谐振频率时,如2.115 GHz和5.813 GHz时,电磁波传输效率较高,其他频率馈入的功率只有很少一部分传导至桥丝并转化成为热,因此,在实际电磁场阈值研究过程中可采用试验的方式构建外界电磁场与桥丝实际响应的耦合关系,这种通过电火工品自身敏感度数据获得电磁场安全阈值方法有效。

## 2 响应特性实验

为进一步研究电火工品电磁场中的实际响应特性,对14号电火工品进行了空间辐射电磁场响应实验研究,以电磁兼容暗室模拟自由空间,采用标准增益天线辐射出电磁波,定量监测电火工品不同频率条件下的实际响应。

### 2.1 样品与装置

样品为14号电火工品。

试验装置:依据图6进行电磁场实际响应测试。其中,信号源、功率放大器、天线可在电磁兼容暗室内形成电磁场,电场探头监测电火工品所处位置电磁场强度,白光干涉光纤传感器可测量电火工品实际响应以获得电磁场频率、强度、响应之间试验数据。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 感应表征

现有检测技术下,电火工品电磁兼容只能通过桥丝响应的测量方式进行,该方法基于白光干涉原理<sup>[13]</sup>,是行业专家评审并得到普遍认可的方法。该法

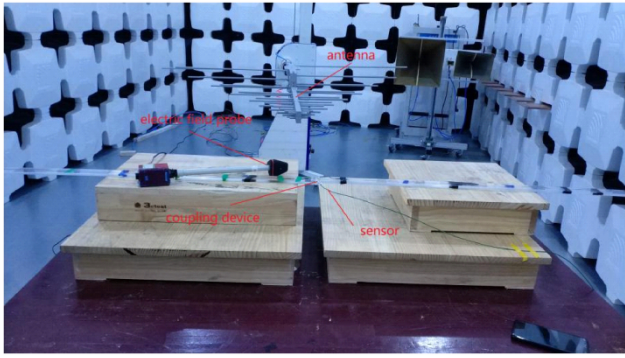


图6 电火工品电磁场测量布置图  
Fig.6 Layout diagram for electromagnetic field measurement of EEDs

依据被测桥丝温度转换成谐振腔长度  $L_c$  的变化开展, 原理如图7所示。方法根据应力-应变与温度的关系, 通过标定试验可得到电磁场感应功率, 如式(5)~(6)对于直角笛卡儿坐标  $(x, y, z)$  由被测物体的温度变化引起的应变分量为:

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = kT \quad (5)$$

$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zx} = 0 \quad (6)$$

式中,  $k$  为物体热膨胀系数;  $\varepsilon_{ij}(i, j=x, y, z)$  为被测物体的  $i, j$  方向上的应变分量;  $T$  为物体的温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

若只考虑光纤温度传感器的轴向应变  $\varepsilon_{zz} = \Delta L/L$ , 则有:

$$\Delta L/L = kT \quad (7)$$

在实际测量电火工品换能元温度时, 配置耦合装置确保光纤传感器的谐振腔与换能元紧密接触。由于

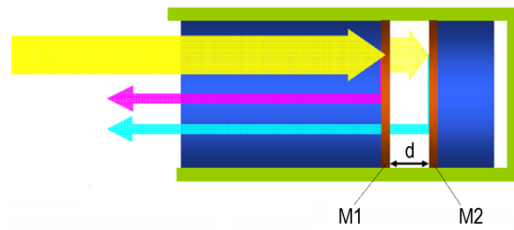


图7 白光干涉法测量原理图  
Fig.7 Principle diagram of white light interferometry measurement

使用环境是电磁场, 耦合装置必须是非铁磁性材料, 兼顾材料硬度及可视要求, 设计采用有机玻璃材料, 得到的耦合装置结构如图8a~8b所示, 为保证测量精度光纤传感器需要与电火工品桥丝紧密接触, 在光学平台下, 分别固定电火工品以及光纤传感器, 完成了耦合光纤与桥丝的对接, 如图8c所示。测试装置组成如图9所示。

根据式(4), 相同直流功率和电磁功率作用于电火工品桥丝上所形成温升一致<sup>[17]</sup>, 因此, 依据计算结果得到了时域图谱, 结果如图10所示。

2.2.2 标定实验

为进一步研究电火工品电磁场感应功率响应, 依据图10建立了直流功率标定系统, 以便构建直流功率与响应之间的函数关系, 具体的布置如图11所示。

利用高精度电流源与电火工品串联回路, 对连接好的接触式光纤测温传感器和电火工品进行直流功率与桥丝热响应的标定。试验数据如表5所示。对其进行2次标定试验, 施加相同的直流功率, 光纤传感器温升基本相同, 拟合二者关系发现温升  $\Delta T$  与功率  $P$  成正比关系, 与

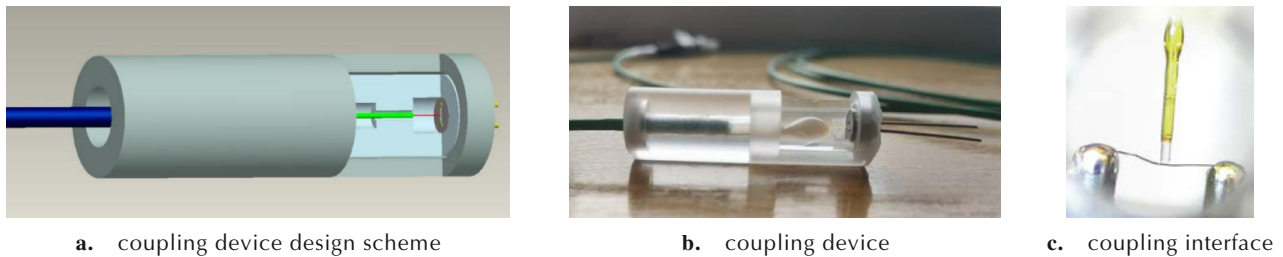


图8 光纤传感器与电火工品测量耦合装置  
Fig.8 Coupling device of sensor and EEDs

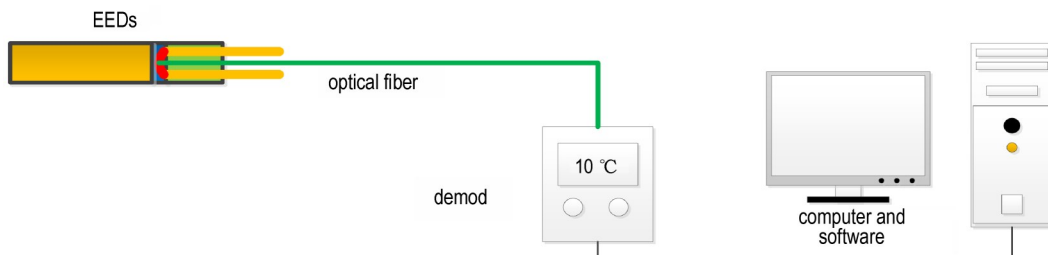


图9 测量装置组成  
Fig.9 Composition of measurement device



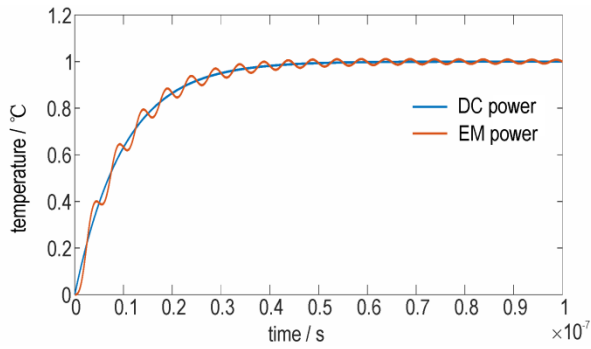


图 10 相同直流功率与电磁功率桥丝温升对比  
Fig.10 Comparison of thermal effect between dc and electromagnetic power

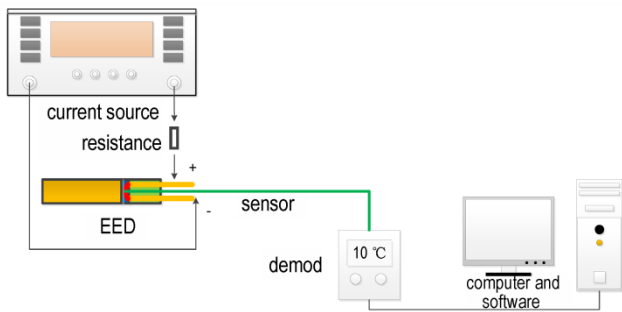


图 11 能量与响应标定原理图  
Fig.11 Schematic diagram of energy and response calibration

表 5 桥丝直流功率-温升响应数据

Table 5 DC response data of hot wire thermal response

current / mA	power / mW	$T_{test 1}$ / °C	$T_{test 2}$ / °C	average temperature / °C
5	0.2	0.25	0.27	0.28
10	0.8	0.94	0.92	0.93
15	1.8	1.92	2.01	1.965
20	3.2	3.88	3.89	3.885
25	5	5.94	6.07	6.005
30	7.2	8.96	9.02	8.99
35	9.8	12.21	12.24	12.225

理论分析一致<sup>[10]</sup>。温升数值  $\Delta T$  与功率  $P$  拟合关系为:

$$\Delta T = 1.21P \quad (8)$$

式中,  $\Delta T$  为电火工品桥丝温升, °C,  $P$  为电火工品获得的电功率, mW。

### 2.3 实验结果与讨论

式(8)和图 12 明确了直流功率与热响应之间的函数关系,以图 12 直流功率与热响应函数关系为基础,获得了不同频率条件下外界电磁场与电火工品热响应之间的对应关系,并依据式(8)计算出温度对应的感应功率,后续的电场阈值曲线根据表 6 中频率-场强-感应功率三者之间的关系可计算推导得到。

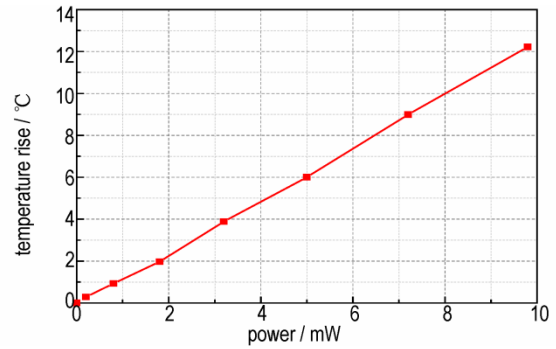


图 12 温升与功率关系图  
Fig.12 Relationship of the temperature rise versus power diagram

表 6 14 号电火工品不同频率电磁波场强与响应之间的规律

Table 6 The law between the field strength and response of different frequency electromagnetic wave

frequency / MHz	test strength / $V \cdot m^{-1}$	actual response / °C	induced power / mW
0.01	50	0.1	0.07
0.2	50	0.15	0.10
2	50	0.22	0.14
4.59	50	0.28	0.18
10.56	50	0.32	0.21
18.38	50	0.4	0.26
24.25	50	1.55	1.02
27.86	50	2.85	1.87
30	50	4.85	3.19
46	50	6.75	4.44
80	5	12.1	7.95
95	5	14.9	9.79
150	4	5.9	3.88
231	5	3.5	2.30
478	5	2.1	1.38
740	10	3.22	2.12
900	20	1.28	0.84
2350	58.7	5.48	3.60
5750	93	7.2	4.73
7200	119	2.55	1.67
8900	137	3	1.97
9000	158	2.6	1.71
10800	160	1.95	1.28
11500	156	1.45	0.95
17000	181	0.55	0.36
18000	177	0.3	0.20

## 3 电磁场阈值研究

为研究电火工品电磁场阈值,以电火工品自身敏感度、实际测试电磁场和电火工品感应电流响应为参数进行线性外推,得到电火工品不同频率的电磁场阈



- [3] 陈亚洲, 乔治军, 刘尚合, 等. 雷电电磁脉冲对电火工品的发火危险性研究[J]. 兵工学报, 2001, 22(3): 419-422.  
CHEN Ya-zhou, QIAO Zhi-jun, LIU Shang-he, et al. Study on the ignition risk of electro-explosive materials caused by lightning electromagnetic pulse[J]. *Journal of Military Engineering*, 2001, 22(3): 419-422.
- [4] 陈亚洲, 魏光辉, 魏明, 等. 雷电电磁脉冲对电火工品的损伤机理[J]. 火工品, 1999(1): 17-20.  
CHEN Ya-zhou, WEI Guang-hui, WEI Ming, et al. Damage mechanism of lightning electromagnetic pulse to EEDs[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1999(1): 17-20.
- [5] 同红海, 褚恩义, 周密, 等. 高空核电磁脉冲对爆炸箔起爆器安全性的影响[J]. 装备环境工程, 2019, 16(9): 40-43.  
TONG Hong-hai, CHU En-yi, ZHOU Mi, et al. Influence of high-altitude nuclear electromagnetic pulse on safety of explosive foil detonator[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(9): 40-43.
- [6] 魏光辉, 潘晓东, 孙永卫, 等. 窄带电磁辐射对无线电引信的作用规律[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(6): 593-598.  
WEI Guang-hui, PAN Xiao-dong, SUN Yong-wei, et al. Action law of narrowband electromagnetic radiation on radio fuze[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(6): 593-598.
- [7] 赵团, 封青梅, 姚洪志, 等. 电火工品感应电流定量测试技术研究[J]. 火工品, 2013(5): 50-52.  
ZHAO Tuan, FENG Qing-mei, YAO Hong-zhi, et al. Research on quantitative measurement technology of induced current of eeds[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2013(5): 50-52.
- [8] 姚洪志, 张蕊, 封青梅, 等. 电爆装置的电磁脉冲响应[J]. 微波学报, 2012(S3): 301-304.  
YAO Hong-zhi, ZHANG Rui, FENG Qing-mei, et al. Electromagnetic pulse response of electroexplosive device[J]. *Journal of Microwave*, 2012(S3): 301-304.
- [9] 杜斌, 颜事龙, 姚洪志. 电雷管电磁场中差模响应特性[J]. 煤炭学报, 2015(s2): 419-424.  
DU Bin, YAN Shi-long, YAO Hong-zhi. Differential mode response characteristics of electric detonator in electromagnetic field[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015(s2): 419-424.
- [10] YAO Hong-zhi, FENG Qing-mei, ZHAO Tuan, et al. Pulse sensitivity of EED[C]//2009 5th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, 2009: 447-449.
- [11] 姚洪志, 赵团, 陈建华, 等. 电火工品时谐电磁场响应数值计算[J]. 火工品, 2020(5): 23-26.  
YAO Hong-zhi, ZHAO Tuan, CHEN Jian-hua, et al. Numerical calculation of time-harmonic electromagnetic field response of EEDs[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2020(5): 23-26.
- [12] 赵团, 姚洪志, 纪向飞, 等. 火箭弹连续波电磁环境中响应特性仿真分析研究[J]. 火工品, 2019(5): 6-9.  
ZHAO Tuan, YAO Hong-zhi, Ji Xiang-fei, et al. Simulation and analysis of rocket response characteristics in continuous wave electromagnetic environment[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2019(5): 6-9.
- [13] DATT S, SHARMA K. Fluoroptic thermometry: Its potential for testing EEDs against hero [C]//1995 International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC), 1995: 248-255.
- [14] 王鹏, 杜志明. 桥丝式电火工品热点火理论[J]. 火工品, 2007(4): 26-30.  
WANG Peng, DU Zhi-ming. Hot spot fire theory of bridge wire EEDs[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2007(4): 26-30.
- [15] YANG Juan, LI Gui-lan, ZHOU Long-fei. Quantitative evaluation for radio-frequency effects of electro-explosive device [C]//2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015: 417-421.
- [16] LAMBRECHT M R, CARTWRIGHT K L, BAUM C E, et al. Electromagnetic modeling of hot-wire detonators[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009(57): 1707-1713.
- [17] 姚洪志, 赵团, 纪向飞, 等. 电火工品电磁兼容时域响应特性[J]. 火工品, 2020(2): 25-28.  
YAO Hong-zhi, ZHAO Tuan, Ji Xiang-fei, et al. Time-domain response characteristics of electromagnetic compatibility of electroexplosive device[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2020(2): 25-28.
- [18] 成伟兰, 汤仕平, 曹兵. 军械电磁辐射危害试验方法[J]. 船舶工程, 2007, 29(6): 92-95.  
CHENG Wei-lan, TANG Shi-ping, CAO Bing. Test method for electromagnetic radiation hazard of ordnance [J]. *Ship Engineering*, 2007, 29(6): 92-95.
- [19] 孙国庆, 王申, 白文静. GJB 1389A-2005《系统电磁兼容性要求》应用指南研究[S]. 航天标准化, 2013(z1): 72-75, 79.  
SUN Guo-qing, WANG Shen, BAI Wen-jing. Research on application guide of GJB 1389A-2005 *System electromagnetic compatibility requirements* [S]. Aerospace Standardization, 2013 (z1): 72-75, 79.

## Electromagnetic Field Safety Threshold of Electro-explosive Devices

YAO Hong-zhi<sup>1,2</sup>, ZHANG Yun<sup>1</sup>, DU Jing-li<sup>1</sup>, ZHAO Tuan<sup>2</sup>, JI Xiang-fei<sup>2</sup>, ZHAO Jia<sup>2</sup>, LI Rui<sup>2</sup>

(1. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physics-chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** In order to explore the electromagnetic field safety threshold of electro-explosive devices (EEDs) and provide a sensitivity evaluation benchmark for the study of electromagnetic compatibility and electromagnetic environmental effects of EEDs, based on the electromagnetic thermal coupling model of EEDs, white light interference method was used to test the electromagnetic field response characteristics of No.14 EED. The effect relationship between electromagnetic field coupling, self sensitivity, and electromagnetic response of EEDs was studied, a test method and calculation method for the electromagnetic field safety threshold of EEDs have been developed, and the electromagnetic field safety threshold of No.14 EED has been obtained within the frequency range of 10 kHz-18 GHz. The results indicate that the sensitive frequency range of No.14 EED is between 40 MHz and 1 GHz.

**Key words:** EEDs; electromagnetic field; coupling model; white light interference; threshold value

**CLC number:** TJ55; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2022296

(责编: 姜梅)