

# 电火工品电磁兼容时域响应特性

姚洪志, 赵 团, 纪向飞, 陈建华, 尹 明

(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:** 将电火工品电起爆理论和算法应用于电火工品电磁兼容时域响应研究, 建立了火工品不同电磁波时域响应的数学模型, 基于换能元感应电磁能量测量方法验证时域特性, 试验结果与计算结果趋势一致且十分吻合。

**关键词:** 电火工品; 电磁兼容; 时域响应; 数学模型

中图分类号: TJ450.1 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.02.007

## Electromagnetic Compatibility Time Domain Response Characteristics of EEDs

YAO Hong-zhi, ZHAO Tuan, JI Xiang-fei, CHEN Jian-hua, YIN Ming

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

**Abstract:** The theory and algorithm of electric initiation are applied to the research on time-domain response of electromagnetic compatibility with electro-explosive devices. The time-domain response mathematical model about different electromagnetic waves of electro-explosive devices is established. The time-domain characteristics are verified based on the measurement method of inductive electromagnetic energy. The test results are consistent with the calculated consequence and in good agreement.

**Key words:** Electro-explosive device; Electromagnetic compatibility; Time domain response; Mathematical model

由电磁环境与装备弹药系统中包含的电火工品或火工系统之间存在的兼容问题, 相互作用导致的危害称为电磁辐射对军械危害问题(Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance 简称 HERO 问题)<sup>[1]</sup>。HERO 问题是由武器弹药中包含的火工品或火工品发火电路与弹药所遭遇的外部电磁辐射之间的根本不兼容引起的。火工品在武器装备中应用广泛, 例如火箭发动机点火, 武器弹药起爆等。这些功能中任何一项由于暴露于电磁能量而无意或过早发生时, 就会产生 HERO 问题。因此, 火工品作为武器弹药中始发元件的电磁环境响应特征研究是武器弹药电磁兼容研究不可忽略的一环。

## 1 电磁环境

电磁环境是指存在特定空间所有电磁现象的综合<sup>[2]</sup>。构成电磁环境的各种电磁危害预案十分复杂, 既有雷电、静电之类的自然电磁危害源, 又有雷达、通讯、广播、电子对抗等射频源和定向能武器等的人为电磁危害源<sup>[3]</sup>。武器弹药对人为电磁危害源的响应特征及防护研究更为重要。

### 1.1 无线电波

包括广播、电视、无线电通信等在自由空间传播的电磁波, 是武器弹药不可避免电磁危害源。为了

不同的应用采用模拟或者数字调制的方式,达到传输信息、内容的目的,通常这些无线电波以正弦波为基础。正弦波典型时域波形如图 1 所示。

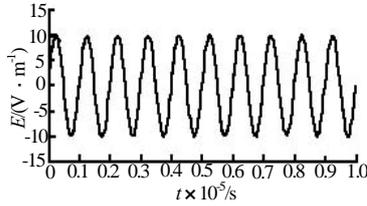


图 1 正弦波时域波形

Fig.1 Sine wave time domain waveform

### 1.2 雷达脉冲

雷达是各武器平台不可或缺的关键设备,具有应用范围广、种类多、频谱宽、电磁辐射强度大等特点,是对武器装备、弹药危害等级比较高的人为电磁辐射源。雷达工作时发射机经天线向空间发射一串重复周期一定的高频脉冲,其中最为简单的雷达脉冲是采用方波调制的周期性脉冲信号<sup>[4]</sup>,具体的时域特征见图 2。

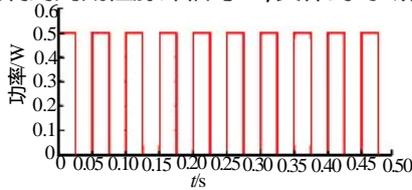


图 2 典型雷达脉冲时域波形

Fig.2 Typical radar pulse time domain waveform

### 1.3 电磁脉冲

电磁脉冲是在核爆炸时,由于伽马光子与空气介质分子相互作用而产生的电磁辐射<sup>[5]</sup>。根据高空核爆炸电磁脉冲的基本理论模型,采用双指数函数<sup>[6]</sup>进行拟合,时域波形如图 3 所示,典型公式见式(1)。

$$E = E_0 K (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

式(1)中: $E_0$ 为峰值场强; $K$ 为修正系数; $\alpha$ 为前沿参数; $\beta$ 为后沿参数。

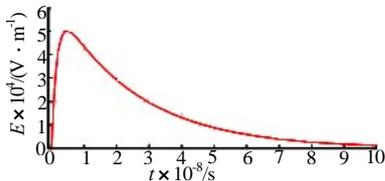


图 3 电磁脉冲时域波形

Fig.3 Electromagnetic pulse time domain waveform

## 2 响应分析

电火工品在电磁场的响应极其复杂,包括电火工品对电磁场的拾取、电磁波在电火工品内部的传输、

电能-热能-化学能的转换,国内外广泛采用 Rosenthal 能量方程进行求解,该能量方程的积分方程如式(2)所示<sup>[7]</sup>:

$$C \frac{dT(t)}{dt} = P(t) - G \cdot T(t) \quad (2)$$

式(2)中: $C$ 为桥丝热容, $J/^\circ C$ ;  $G$ 为桥丝散热系数, $J/(s \cdot ^\circ C)$ ;  $T(t)$ 为桥丝温度差(初始温度为环境温度), $^\circ C$ ;  $P$ 为桥丝电功率, $W$ 。

令  $\theta = C \cdot T(t)$ ,  $\tau = C/G$ , 则:

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{\tau} \theta = P(t) \quad (3)$$

根据 Rosenthal 能量方程,可以计算出输入电功率与桥丝温度变化量之间的关系,用来分析电火工品的电磁-热响应十分便利,结果也是非常可靠的。由公式(3)可以看出,火工品桥丝温度变化只与桥丝获得的电功率以及火工品的固有参数有关。通过不同信号特征电磁波在火工品桥丝产生的时域效应,可以更加直观地研究火工品电磁环境下的响应特性。某型桥丝热性能参数见表 1。

表 1 某型桥丝热性能参数

Tab.1 Bridge wire thermal parameters	
参数	数值
桥丝热容/ $(\mu J \cdot ^\circ C^{-1})$	200
散热系数/ $(mJ \cdot s^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	4
热时间常数/ms	50

### 2.1 正弦电磁波

根据公式(3),在已知电火工品桥丝上射频电流的前提下,就可以计算桥丝形成的温升,典型射频电流使桥丝温升在时域上的表现如图 4 所示。根据 Rosenthal 能量方程,建立:

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{\tau} \theta = (\sin(2\pi \times f \times t))^2 \quad (4)$$

令  $\omega = 2\pi \times f$ , 其中  $f$  为电磁波的频率,根据公式(4),则可以得到:

$$T(t) = \frac{1}{C} \left[ \frac{\tau}{2} - \frac{1}{\tau} \frac{\cos(2\omega t) + 2\omega \sin(2\omega t)}{2(\frac{1}{\tau^2} + 4\omega^2)} \right] \times \left[ 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (5)$$

当正弦电磁波频率为 10Hz 时,其在火工品桥丝上的热响应如图 4 所示。

根据图 4 所示,当正弦电磁波震荡周期远大于火工品热时间常数时,其热响应的震荡现象明显。当正弦电磁波频率大于 1kHz 时,其在电火工品桥丝上的

热响应如图 5 所示。

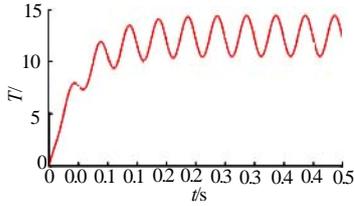


图 4 电火工品 10Hz 正弦波热响应

Fig.4 Thermal response of 10Hz sinusoidal wave on EED

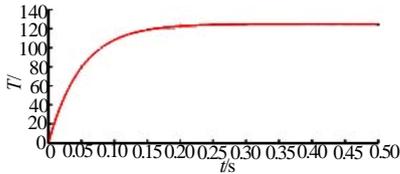


图 5 电火工品 1kHz 正弦波热响应

Fig.5 Thermal response of 1kHz sinusoidal wave on EED

根据图 5 可以看出,当正弦电磁波震荡周期远小于热时间常数时,电火工品在正弦电磁功率作用下,在时域上会达到热平衡的状态,这与直流功率加载的情况是一致的。

### 2.2 雷达脉冲

通过图 2 可以看出雷达脉冲波属于周期性电磁信号,当雷达脉冲信号的周期为  $t_0$ ,功率加载的时间为  $0.5t_0$ ,也就是雷达脉冲波的占空比为 50%,根据 Rosenthol 能量方程获得第 1 个周期内火工品桥丝温度的关系式:

$$T(t) = \begin{cases} \frac{P(t)}{C} \times [1 - e^{-\frac{t}{\tau}}], & 0 \leq t < 0.5t_0 \\ P(0.5t_0) \times e^{-\frac{t}{\tau}}, & 0.5t_0 \leq t < t_0 \end{cases} \quad (6)$$

电火工品雷达脉冲热响应如图 6 所示。根据图 6 可以看出,在雷达脉冲波的作用下火工品桥丝的温度在 1 个周期内呈先上升后下降的趋势,直到达到热平衡。随着雷达脉冲载波频率的上升,图 6 中的锯齿效应会逐渐降低,同时雷达脉冲的占空比越小电火工品时域电热响应中的锯齿效应越明显。

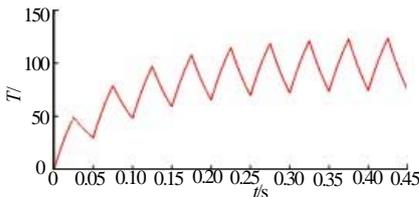


图 6 火工品雷达脉冲热响应

Fig.6 Thermal response of radar pulse on EED

### 2.3 电磁脉冲

根据电火工品电磁脉冲响应研究相关结论<sup>[8]</sup>,电

火工品在电磁脉冲环境下的感应电流振荡周期与引线长度有直接关系。

$$T_c = \frac{4L}{v} \quad (7)$$

式 (7) 中:  $T_c$  为电流的振荡周期;  $L$  为电火工品引线长度;  $v$  为射频电流在火工品中的传播速度,  $3 \times 10^8$  m/s。通过拟合曲线获得其感应电流的表达式如式 (8) 所示,感应电流波形如图 7 所示。

$$I_c = 50 \times e^{-\frac{t}{3 \times 10^{-8}}} \times \sin(2 \times \pi \times 2.5 \times 10^7 \times t) \quad (8)$$

由于电磁脉冲在电火工品换能元上感应的电流作用时间短,远远小于电火工品的热时间常数,因此电磁脉冲对于电火工品的作用属于绝热响应过程,即电磁脉冲感应能量全部转化为电火工品的热效应。根据公式 (3) 计算桥丝温度的时域响应曲线(温度上升部分),如图 8 所示。

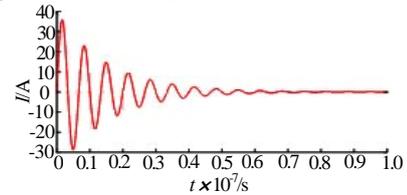


图 7 典型火工品电磁脉冲感应电流波形

Fig.7 Induced current waveform of electromagnetic pulse on typical EED

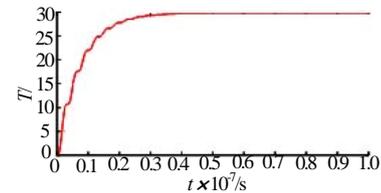


图 8 电火工品电磁脉冲热响应曲线

Fig.8 Thermal response waveform of EMP on EED

通过 3 种典型电磁波对电火工品热响应时域特性理论分析,可知周期性的正弦电磁波与雷达脉冲在一定条件下均会达到热平衡状态,非周期信号的电磁脉冲则在非常短的时间内达到温度峰值,在此期间内没有激发电火工品,则其温度会慢慢消散至室温状态。

## 3 试验验证

通过试验来验证理论计算的电火工品电磁波时域特性,采用电火工品光纤温度测量方法<sup>[9]</sup>,对正弦电磁波和雷达脉冲波下电火工品实际热响应进行测量;而电火工品对于电磁脉冲波的效应属于绝热响应

特性,需使用罗国夫斯基线圈对其桥丝上感应电流进行测量研究,直接关注其电流变化。

### 3.1 正弦波

正弦波情况下,采用光纤温度传感器来检测桥丝上的温度响应,实际响应情况如图9所示。

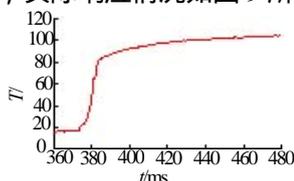


图9 电火工品正弦波实际热响应

Fig.9 Actual thermal response of the sinusoidal wave on EED

### 3.2 雷达脉冲波

根据前面的响应分析,雷达脉冲情况与正弦波一致,最终会达到热平衡的状态,因此同样采用光纤温度传感器来测量电火工品桥丝温度变化,如图10所示。

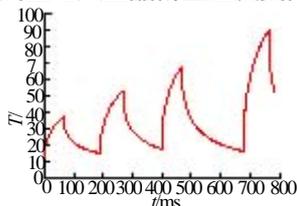


图10 电火工品雷达脉冲波实际热响应

Fig.10 Actual thermal response of radar pulse wave on EED

### 3.3 电磁脉冲波

电火工品电磁脉冲试验特征与周期性信号差异很大,通常采用电磁脉冲发生器加 GTEM 装置的方式形成电磁脉冲,对电火工品进行时域响应分析。

根据图3和图7,电磁脉冲信号作用时间小于0.1  $\mu\text{s}$ ,温度测量传感器响应时间在1ms以上,暂时无法实现对其的定量表征,只能采用响应时间更快的罗国夫斯基线圈对其感应电流进行测量,进而研究其响应特性,试验结果如图11所示。

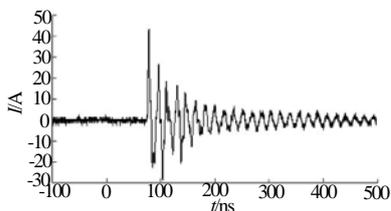


图11 电火工品电磁脉冲感应电流实际响应

Fig.11 Actual induced current response of electromagnetic pulse on EED

从图9~11不同信号特征电磁波对电火工品的实际响应试验结果,可以看出数值计算与试验结果基本一致,通过试验验证了数值计算的正确性,获得了典

型电磁波条件下电火工品桥丝的时域响应,为电火工品电磁兼容、电磁辐射阈值研究提供了参考依据。

## 4 结论

通过理论计算和试验研究,可以获得以下结论:

(1) 明确了电火工品不同信号特征电磁辐射电热响应时域变化情况;(2) 对于正弦电磁波,电火工品时域响应呈热稳态趋势,且当正弦电磁波震荡周期远小于电火工品热时间常数时,其桥丝响应状态接近同功率条件的直流输入水平;(3) 对于雷达脉冲波,电火工品时域响应呈锯齿震荡趋势,这与雷达脉冲波的周期与占空比联系密切;(4) 对于电磁脉冲波,电火工品电流时域响应呈阻尼震荡趋势,流经桥丝的电磁能量全部参与热能的转化,而热响应为绝热响应趋势。理论计算和试验验证结果一致,趋势吻合,可为电火工品电磁兼容研究提供一定的指导。

### 参考文献:

- [1] MIL-HDBK-240A Hazards of electromagnetic radiation to ordnance test guide [S].US:Department of Defense,2011.
- [2] 潘镜芙.21世纪武器装备发展及其对策研究[J].舰船电子工程,2004(24):1-3.
- [3] 刘尚合.复杂电磁环境下导弹武器系统生存研究[J].武器装备自动化,2007(26):5-6.
- [4] 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(40):419-424.
- [5] Dictionary for technologies of electromagnetic compatibility (EMC), electromagnetic pulse (EMP), and electrostatic discharge (ESD)[R]. IEEE/ANSI C63.14-1998,1998.
- [6] 谢彦召,王赞基,王群书,周辉,孙蓓云.高空核爆炸电磁脉冲波形标准及特征分析[J].强激光与粒子束,2003(15):781-786.
- [7] 蔡瑞娇.火工品设计原理[M].北京:北京理工大学出版社,1999.
- [8] 姚洪志,封青梅,纪向飞,赵团.电爆装置电磁脉冲响应分析[J].河北科技大学学报,2011(32):45-48.
- [9] 赵团,封青梅,姚洪志,纪向飞.电火工品感应电流定量测试技术研究[J].火工品,2013(5):50-52.