



·高功率微波技术·综述·

实装灼热桥丝式电火工品电磁辐射 敏感度测试方法评述*

吕旭旭, 魏光辉

(陆军工程大学(石家庄校区)电磁环境效应国家重点实验室, 石家庄 050003)

摘 要: 从实装灼热桥丝式电火工品的电磁辐射安全性评估技术角度出发, 评述了近年来灼热桥丝式电火工品电磁辐射安全性的几种测试评估方法, 并指出了未来应重点研究的方向。研究指出采用高精度、快响应的光纤测温装置监测灼热桥丝式电火工品在外部强场辐照下的温升响应, 通过外推确定受试电火工品的发火敏感度, 从而对灼热桥丝式电火工品的电磁辐射安全性进行评估是突破现有评估技术瓶颈的有效措施; 应进一步研究解决脉冲条件下由于灼热桥丝式电火工品桥丝响应时间远小于光纤测温装置响应时间导致的无法精确测温问题, 以满足实装灼热桥丝式电火工品电磁辐射安全性评估的实际需求。

关键词: 灼热桥丝; 电火工品; 电磁兼容; 安全性评估; 光纤测温装置

中图分类号: TJ54

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220346

Comments on the electromagnetic safety assessment method for hot bridge wire electro-explosive device

Lü Xuxu, Wei Guanghui

(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment Effects, Army Engineering University (Shijiazhuang Campus), Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: From the point of view of electromagnetic radiation safety assessment technology of hot bridge wire electro-explosive devices (EEDs), several test methods of electromagnetic radiation safety assessment of hot bridge wire EEDs in recent years have been reviewed, and the direction of research to focus on is pointed out. It is pointed out that the use of a high-precision, fast-response new fiber-optic temperature measurement device to monitor the temperature rise response of the hot bridge wire EEDs under external strong field irradiation, through extrapolation to determine the critical stimulus of the tested EEDs, to assess the electromagnetic radiation safety of the hot bridge wire EEDs is an effective measure to break through the bottleneck of the existing test and evaluation technology; as the response time of the bridge wire is much shorter than that of the fiber optic temperature measurement device, to accurately measure the temperature, further study be made should to solve this problem, thus to meet the practical needs of the actually installed hot bridge wire EEDs' electromagnetic radiation safety assessment.

Key words: hot bridge wire, electro-explosive device, electromagnetic compatibility, safety assessment, fiber optic temperature measuring device

随着雷达、通信等大功率用频装备的应用范围不断扩大, 其与电发火、电起爆弹药、安全应急装置(以下统称为弹药)或其它武器系统等共存于飞机、舰船等大型装备平台, 使弹药面临的电磁环境十分复杂^[1-2]; 舰载机和直升机在挂弹起飞或着舰的过程中, 可能会遭遇雷达辐射, 使弹药所处的电磁环境更加恶劣^[3], 弹药还会遭遇敌方高功率微波和电磁脉冲武器的近距离攻击, 外部强电磁场辐射对弹药甚至武器平台的安全性构成了致命威胁。为提高弹药发射、起爆的可靠性与安全性, 增强爆破威力, 新型弹药系统大多采用电爆装置(EED)作为点火元件^[4-6]。电爆装置的功能首发性和作用敏感性决定了它在弹药系统中的地位和作用, 其安全性和可靠性直接影响弹药系统作

* 收稿日期: 2022-10-14; 修订日期: 2023-01-04
基金项目: 国防基础科研重点项目 (50909030501)
联系方式: 吕旭旭, lyuxuxu@163.com。
通信作者: 魏光辉, wei-guanghui@sohu.com。

战效能的发挥和战斗人员的安全。

弹药中的普通火炸药难以直接耦合电磁辐射能量,外界电磁辐射一般不能导致其意外发火。含有金属粉末的火炸药,在强场电磁辐射作用下,金属粉末之间可能产生火花放电导致意外引爆,但这类火炸药在实际使用状态下一般处于金属密闭壳体内,不具备耦合强场电磁辐射的条件。电爆装置通常采用串联结构,首级大多采用灼热桥丝式电火工品^[7-9],其对静电放电(ESD)、射频干扰(RFI)、高功率微波(HPM)和电磁脉冲(EMP)相对敏感^[10],后级火炸药虽然爆炸威力逐级增强,但对电磁辐射逐级钝感。因此,弹药系统的直接电磁辐射安全性取决于电爆装置的首级灼热桥丝式电火工品在实际安装使用状态下的电磁辐射安全性。

然而实装灼热桥丝式电火工品等效天线短、对电磁辐射的耦合能力有限且具有很强的选频特性,在现有试验条件下,除非给受试电火工品添加电磁辐射接收天线,一般不能直接测试其临界发火场强,即使采用高功率微波源辐照,由于辐射频率不能连续调节,难以确定其频率敏感性,导致弹药系统的电磁辐射安全性没有底数,电磁防护缺乏依据。美军在20世纪50年代就提出了电磁辐射对军械的危害问题(HERO),并制定了一系列标准来指导装备的设计、生产以及效应试验。比如MIL-STD-1512^[11]中强调了点火系统和引信在正常寿命周期内,在电磁辐射(EMR)、静电放电、电磁脉冲、电磁干扰(EMI)、雷电作用(LE)或电源瞬变(PST)的环境暴露过程中和暴露后,不应意外解除保险和作用;MIL-STD-464C^[12]中规定了军械在不同频率的外界辐射场下需承受的场强值。我国在该方面研究相对较晚,直到20世纪90年代才形成了一些标准^[13-15],如GJB 1389A-2005给出了在舰船上发射机主波束下陆军直升机面临的外部电磁环境,其大部分频段的场强远高于200 V/m,在2.7~3.6 GHz频段内,电磁环境峰值场强高达27460 V/m,对于需要确保安全的电火工品,其最大不发火激励应至少具有16.5 dB的安全裕度,而现有标准中采用的是以信号源、宽带功率放大器、辐射天线为主构建的电磁辐射系统,这些试验指标是目前实验室条件难以达到的,此外GJB 7504中使用的电流监测装置主要是电流传感器,其适用频率也不宜过高。针对现有实验室条件难以实现高场强水平的难题,陆军工程大学的魏光辉教授团队提出了差模注入法^[16-18],其频率使用范围可达18 GHz,该方法被GJB 8848所收录,GJB 8848在附录F中介绍了其所使用的差模注入耦合模块,该耦合装置尺寸在几十cm左右且3#、6#端口为匹配负载,一般固定为50 Ω ,而同一型号的灼热桥丝式电火工品桥丝阻值呈概率分布,若采用该方法则需要频繁更换匹配负载,并且二者在实装条件下也难以实现电气连接,故应用受限;若采用实际装备上的高功率发射机进行效应试验,试验频率难以调节,无法保证测试合格的电火工品在其他频率、相同强度的电磁辐射作用下的安全性。

为此,评估实装灼热桥丝式电火工品在强电磁场环境下的安全性,必须探索更科学的效应等效试验方法。目前国内外学者的研究集中在感应测试法和光纤测温法两个方面,主要通过监测灼热桥丝式电火工品的响应,测试外推确定受试火工品的发火场强,从而对灼热桥丝式电火工品的电磁辐射安全性进行评估。本文首先介绍了灼热桥丝式电火工品的点火过程和温升模型,然后从感应测试法和光纤测温法两个方面详细论述了灼热桥丝式电火工品电磁安全性评估方法的研究进展,最后指出了下一步需重点解决的问题。

1 温升数理模型

灼热桥丝式电火工品的温升数理模型是基于热传导理论和热点火理论,结合其点火过程,在合理假设的基础上,分析各种激励下的桥丝和药剂温升特点,从而为其电磁辐射安全性评估试验提供理论指导。其热点火过程的桥丝温升曲线如图1所示,可以归纳为升温 and 点火两个阶段。

升温阶段指图1中的O-A-B段曲线,灼热桥丝式电火工品在电流的激励下,桥丝依据焦耳定律迅速升温,同时向其周围初级点火药传热,初级点火药依据阿伦尼乌斯定律发生分解放热反应,此阶段药剂的化学反应放热速率较慢,远小于桥丝的电热速率,故可忽略,系统温度主要由桥丝的焦耳热决定。点火阶段指图1中BC段曲线,在桥药系统经历了升温阶段之后,由于桥丝焦耳热和药剂化学反应放热的积累,使系统温度达到了一个临界点,随后化学反应放热速率大于焦耳热速率,该阶段系统温度可使药剂发生热点自持反应,导致系统温度急剧上升,电火工品发火,系统温度主要由化学放热决定。

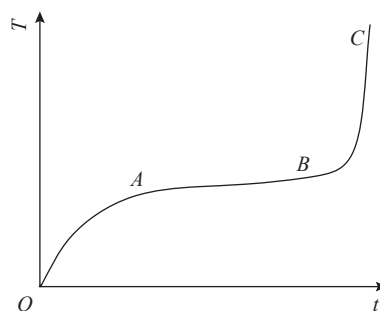


Fig. 1 Bridge wire temperature rise curve

图1 桥丝温升曲线

1961年, Rosenthal L A^[19]首次提出了灼热桥丝式电火工品的集总参数方程, 也称 Rosenthal 方程, 其表达式如式(1)所示。该方程忽略了升温阶段的药剂化学放热及桥丝和药剂的温度梯度, 方程形式简单, 易于分析, 被广泛应用。

$$C_p \frac{dT_c}{dt} + \gamma T_c = P(t) \quad (1)$$

式中: C_p 为灼热桥丝式电火工品的集总热容, T_c 为桥丝温升, γ 为集总散热系数, P 为桥丝的电功率。

Koc S^[20]等人从能量的角度出发建立了灼热桥丝式电火工品的桥丝温升数学模型, 其形式与 Rosenthal 方程基本一致, 基于数学模型计算了稳恒电流和矩形脉冲串电流注入下的桥丝温升。研究表明, 稳恒电流注入下桥丝可达热平衡且平衡温升与电流幅值的平方成正比, 在矩形脉冲串电流注入下, 仅当其重复周期远远小于桥丝热时间常数时, 桥丝才会达到“近似”热平衡态。

王鹏^[21]等人将升温阶段的桥丝药剂系统近似为绝热系统处理, 并定义点火阶段的药剂分解放热反应为绝对超临界化学放热模型, 并根据这两个假设给出了电火工品的热点火温度, 升温时间和爆炸时间计算公式, 数值计算结果表明该理论模型与试验数据的吻合度较高。

Ye Juan^[22]等人则基于傅里叶温控方程建立了灼热桥丝式电火工品的温升模型, 仿真结果表明在射频电流注入下, 桥丝温升响应与稳恒电流类似且桥丝中心的温度最高, 最易形成热点, 其数理模型表达式如下

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\lambda \nabla^2 T + q_v \quad (2)$$

式中: ρ 为密度, c 为比热容, T 为温度, λ 为散热系数, q_v 为内热源。式(2)可采用有限差分法进行数值求解。

当求解区域为桥丝时, 内热源为桥丝的电功率。表达式为

$$q_v = I^2 \frac{1 + \alpha T_1}{\sigma_1 \pi^2 r_0^2} \quad (3)$$

式中: I 为桥丝上的电流, α 为桥丝的电阻温度系数, σ_1 为桥丝电导率, r_0 为桥丝半径, T_1 为桥丝温度。

当求解区域为药剂时, 内热源为药剂的化学反应放热, 其遵循零次阿伦尼乌斯定律。表达式为

$$q_v = \rho_2 Q A e^{\frac{-E}{RT_2}} \quad (4)$$

式中: ρ_2 为药剂密度, Q 为反应热, A 为频率因子, E 为活化能, R 为普适气体常数, T_2 为药剂温度。

Li Jinpeng^[23]和 Pantoja J^[24]等人则将灼热桥丝式电火工品等效为由三段均匀传输线组成的非均匀传输线模型(如图2所示), 通过 Agrawal 模型和传输线理论计算桥丝在外界辐射场照射下每段均匀传输线的电流响应, 然后根据叠加原理计算桥丝上的总感应电流。仿真结果表明, 在射频辐射下, 灼热桥丝式电火工品的感应电流与桥丝尺寸, 辐射场的入射方向和频率均有关系, 且有明显的谐振现象。

此外还有一些可支持电、磁和热等多物理场联合仿真的软件, 例如 CST 三维电磁场仿真软件, COMOSL 有限元软件等, 能够快捷地对灼热桥丝式电火工品在各种作用下的响应规律进行仿真和总结, 为灼热桥丝式电火工品的电磁效应试验提供科学指导。虽然针对灼热桥丝式电火工品的温升模型研究较多, 然而其发火过程是一个电热耦合, 桥丝和药剂相互传热的复杂过程, 数理模型参数无法做到与实际灼热桥丝式电火工品保持严格一致, 仿真分析的准确度普遍不高, 其结果仅可用于定性研究, 无法定量评估电火工品的电磁辐射安全性, 可靠的安全性评估还须依靠效应试验。

2 安全性评估方法

2.1 感应测试法

感应测试法指利用电压、电流等传感器或功率计直接或间接地测量出桥丝在各类环境下的感应量, 并将测试得到的感应量与受试灼热桥丝式电火工品的临界值作比较, 从而判断其安全性, 安全裕度评估公式如下

$$M = \begin{cases} 20 \lg(I_R/I_c) \\ 20 \lg(V_R/V_c) \\ 10 \lg(P_R/P_c) \end{cases} \quad (5)$$

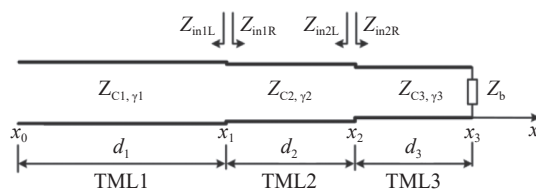


Fig. 2 Non-uniform TML model of the hot bridge-wire EED^[23]

图2 灼热桥丝式电火工品非均匀传输线模型^[23]

式中: M 为安全裕度, 下标 R 代表测试的感应量, 下标 c 表示受试火工品的临界感度。

Mishra K K^[25] 等人搭建了图 3 的灼热桥丝式电火工品点火能测试系统, 利用霍尔传感器和光电探测器对电火工品在脉冲电流注入条件下的点火能进行了测量, 点火能测量的准确性与点火时刻紧密相关。文章定义点火时刻为光电探测器输出波形刚上升的时刻, 点火时刻要依靠霍尔传感器和光电探测器的输出并结合人为判断才能确定, 测量误差增大, 且在高频下, 由于驻波效应, 导线上的感应电流幅值随导线位置相差较大, 霍尔传感器的放置位置对测量结果影响也较大, 故该试验系统无法对高频电磁辐射下灼热桥丝式电火工品的点火能进行测量。

Wang Jun^[26] 等人利用感应测试法对集成半导体桥式 (ISCB) 和半导体桥式 (SCB) 电点火头在电容放电能量注入下的安全性进行了试验 (测试系统如图 4 所示), 并对比了二者在相同电路参数作用下灼热桥丝式电火工品的电流、电压和能量等参数, 结果表明 ISCB 具有更好的防护效果, 但未测试其在电磁辐射作用下的效果。

王可暄^[27] 等人利用场强计和电流环测量了连续波辐照条件下灼热桥丝式电火工品的桥丝感应电流 (试验原理如图 5 所示), 讨论了辐射场的频率和场强对感应电流幅值的影响规律, 试验表明连续波辐射环境下灼热桥丝式电火工品的脚线长度所对应的谐振频率是影响其电磁响应特性的重要因素, 且二者的关系满足式 (6), 然而其试验频率上限值为 360 MHz, 不满足 GJB1389A-2005 的频率范围要求。

$$f_{\max} = (2n - 1) \frac{150}{l}, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (6)$$

式中: l 为灼热桥丝式电火工品的引线长度, f_{\max} 为谐振频率。

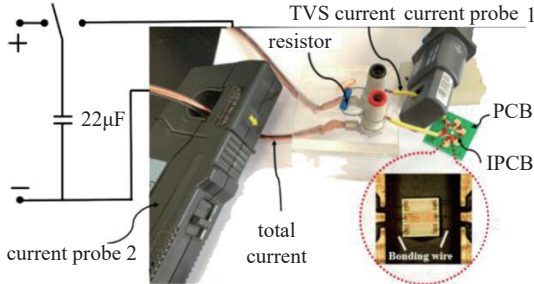


Fig. 4 Schematic diagram of the capacitor discharge unit^[26]

图 4 电容放电装置示意图^[26]

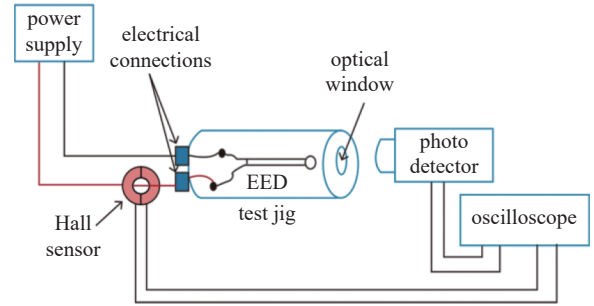


Fig. 3 Experimental setup to determine the electrical energy for ignition of EED^[25]

图 3 灼热桥丝式电火工品点火能测试装置^[25]

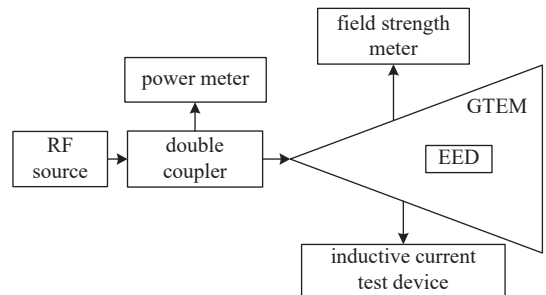


Fig. 5 Principle of electromagnetic radiation experiment^[27]

图 5 灼热桥丝式电火工品电磁辐射试验原理^[27]

据以上分析可以看出, 采用感应测试法对热桥丝式电火工品的电磁安全性进行评估时, 大部分试验频率在 1 GHz 以下, 这是因为在高频情况下, 由于驻波效应^[28], 桥丝不同位置的电流幅值差异明显, 此时测试给出的感应电流与实际加热桥丝的感应电流存在较大误差, 并且由于电压/电流探头本身在电磁场中也会受到电磁感应作用, 影响测量精度, 因此, 感应测试法的适用频率上限不宜超过 1 GHz。而有研究^[29] 表明, 1 GHz 以上微波频段的电磁辐射能量更容易被灼热桥丝式电火工品耦合, 对灼热桥丝式电火工品的威胁更大, 采用感应测试法不能满足强场电磁辐射下灼热桥丝式电火工品安全性测试评估的技术需求。

2.2 光纤测温法

为解决感应测试法使用频率范围受限的问题, 研究人员将视线转移到了桥丝温度的测量上。根据灼热桥丝式电火工品的热点火理论, 在电点火头中通入电流使桥丝发热, 通过桥丝加热其周围的含能药剂, 当温度达到一定值时, 电火工品发火^[30], 即灼热桥丝式电火工品的发火与否本质上取决于其桥丝温度, 而桥丝温度的测量解决方案可以做到与其所处的电磁环境无关, 这为解决微波频段电火工品的电磁安全性评估方法提供了新的研究方向。

2.2.1 测温方案

利用测温法判断灼热桥丝式电火工品的电磁安全性大致经历了 3 个阶段: 简单判别阶段, 热电测试阶段和光纤测温阶段。

简单判别阶段是采用某种在特定温度碳化的敏感材料,通过观察材料是否碳化判断桥丝表面的温度是否曾经达到了某一温度,这种方法只能粗略的估计桥丝表面的温度值,而热电测试阶段主要采用热电偶元件,在测量时需要将其直接与桥丝接触,这将改变桥丝的输入阻抗特性和热容,并且该方法也需要引入金属导体,同样会受到外部强电磁场环境影响,这两阶段的测试方法响应时间较长,测量误差大,故不再赘述。

光纤测温阶段所用的传感器精度高,体积小,响应速度快,且不会受到环境电磁场的影响,是目前最先进的温度测量解决方案,按具体的测温原理大致可分为:光纤红外测温装置,光纤荧光测温装置,白光干涉型光纤测温装置和砷化镓(GaAs)光纤测温装置。

光纤红外测温的理论基础是史蒂芬-玻耳兹曼定律(Stefan-Boltzmann)和普朗克(Planck)热辐射公式,该类测温系统自身不带光源,而是利用被测物体自身发出的光谱进行温度测量,其突出优点是响应速度非常快,可低至几 μs ,且属于被动、非接触式测量,几乎不影响被测物体的热特性和电磁特性,但存在致命的缺陷:其测量的不是物体的真实温度,而是亮度温度^[31],受测试环境背景辐射影响较大,在测量微小物体(如灼热桥丝式电火工品桥丝)的表面温度时,无法保证测量结果的精准性,制约了该方法在灼热桥丝式电火工品电磁辐射安全性评估方面的应用。

光纤荧光测温技术是根据荧光的衰减时间与温度相关的原理完成温度测量的,测温原理见图6^[32]。这种测温装置具有体积小,不受环境电磁场的影响等优点,但这种测温系统也存在致命的缺点:一是其测量的精度和荧光寿命的计算误差有关,且易受外界温度影响;二是其响应时间长,目前光纤荧光测温装置的采样时间可达到10ms,考虑到测温探头的热平衡过程,测温装置的响应时间将达到s级^[33],而高功率微波的脉冲宽度一般小于1 μs ,其无法用于瞬时脉冲激励下的桥丝温升测量。

白光干涉型光纤测温技术是基于法布里-珀罗(Fabry-Perot)干涉原理,属于主动、接触式测温方法,具有测温精确且传感器探头尺寸小、响应快等优点,其测温原理如图7所示,当其探测器温度变化时,干涉腔的腔长发生改变,干涉条纹随之改变,后续检测电路和信号处理单元分析干涉条纹的特征就可以计算出探测器的温度。该类测温装置应用于灼热桥丝式电火工品的桥丝温度测量时,同样存在致命的缺点:一是该测温法的测温精度与测温探头和桥丝的接触状态有关,容易受到人为因素的影响;二是白光干涉型光纤测温装置响应时间仍然在秒级^[34-36],也无法直接用于电磁脉冲下的桥丝温度测量。

砷化镓(GaAs)光纤测温是基于半导体带隙(SCBG)技术,属于最新型的测温技术,图8^[37]是加拿大OpSens公司研制的新型GaAs光纤测温装置原理图。

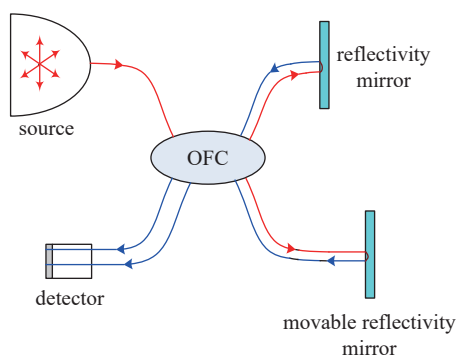


Fig. 7 Schematic diagram of white light interference type fiber optic temperature measurement device

图7 白光干涉型测温原理

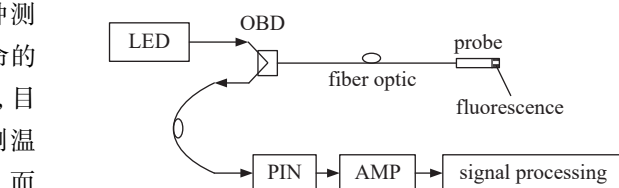


Fig. 6 Optical path diagram of fiber optic fluorescence pyrometry

图6 光纤荧光测温法光路图

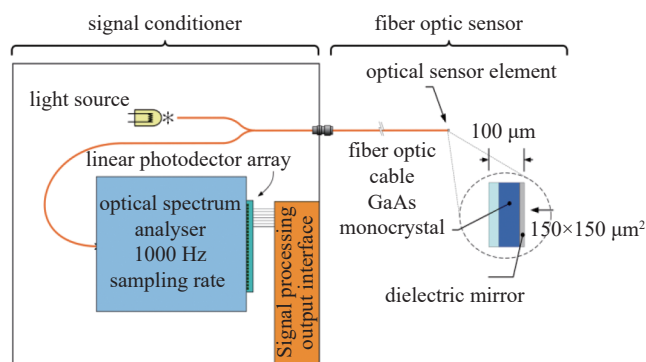


Fig. 8 Schematic diagram of GaAs fiber optic temperature measurement device^[37]

图8 GaAs 光纤测温装置原理图^[37]

GaAs 光纤测温装置可以实现对点的精确测温,传感器探头采用 GaAs 半导体晶片,性能稳定,可靠性高,响应速度快,不受外界强磁场影响,是真正的无源传感器。传感器体积小,线度低至亚 mm 级,特别适于微小物体的温度测量。虽然该类测温装置的采样时间可低至 1ms,但传感器探头需与被测物体紧密贴合才能确保精确测温,受测温探头传热和热平衡过程的影响,其测温的响应时间要达到几百 ms^[38],同样无法直接测量电磁脉冲作用下电火工品的桥丝温度。现有的几种光纤测温装置特点见表1。

表 1 几种光纤测温装置特点

Table 1 Characteristics of several types of fiber-optic temperature measurement devices

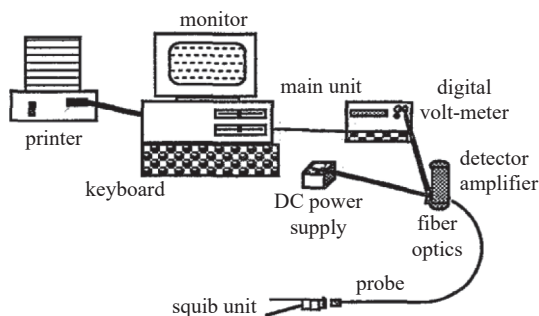
type	response time	precision
fiber infrared	microseconds	lower
fiber optic fluorescence	seconds	low
white light interference	seconds	high
GaAs	sub-second	higher

2.2.2 评估方法

国外应用测温法来评估电火工品电磁安全性的研究相对较早。在 1987 年, Lee K R^[39] 等人就基于红外光纤测温装置建立了一套灼热桥丝式电火工品桥丝温升测量系统(测试系统如图 9 所示), 对稳恒电流注入下的裸桥(去除点火药剂)温升进行了测量, 并建议用同样的方法对裸桥在辐射条件下的感应电流进行测量, 但研究中并未进行辐射条件下的桥丝温升测量试验, 也未给出相应的安全性评估方法。

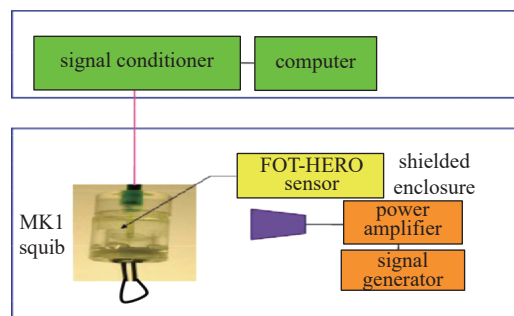
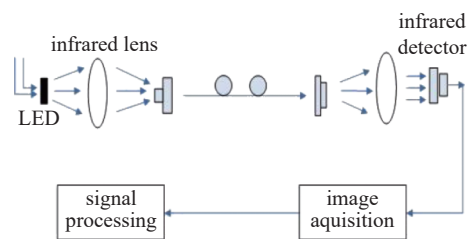
2007 年, 国内王韶光^[40] 等人首次采用白光干涉型光纤测温仪对灼热桥丝式电火工品的安全裕度进行了测试评估, 其试验方法是以稳恒电流注入条件下的裸桥温升 T_c 与注入稳恒电流 I_0 的幅值关系为基准曲线, 即建立 $T_c = kI_0^2$, k 为比例系数, 然后通过光纤测温装置获取桥丝在静电放电作用下的裸桥温升 T_c^* , 根据基准曲线直接获取桥丝上的等效稳恒电流 $I^* = \sqrt{T_c^*/k}$, 由此判断电火工品安全性。但该研究没有分析静电放电作用下测温结果的准确性, 静电安全性评估结果有待商榷, 此外也未对辐射条件下的灼热桥丝式电火工品安全性如何评估进行说明。

2011 年, Kichouliya R^[41] 等人采用白光干涉型光纤测温装置(FOT-HERO), 同样以温升为中间量, 对灼热桥丝式电火工品在连续波辐射条件下的感应电流进行了测量(试验组成如图 10 所示), 并建立低场强辐射下的场强值与感应电流的关系, 经线性外推, 获取高场强下的桥丝感应电流值, 以此对 MK1 型电火工品的连续波电磁辐射安全性进行评估, 试验对比了 400 MHz~8.2 GHz 频率范围内外推法与直接辐照法测试的感应电流大小, 结果表明, 该方法准确性较好, 但文中并没有涉及灼热桥丝式电火工品在电磁脉冲辐射下的安全性评估方法, 此外, 该研究测温对象为裸桥, 其与带药情况下的桥丝散热状态不同, 直接采用裸桥测温结果进行安全性评估会引入一定的误差。

Fig. 9 System diagram^[39]图 9 测试系统图^[39]

2013 年, 赵团^[42] 和 Xin Liwei^[43] 等人分别搭建了红外光纤测温试验装置(测温系统如图 11 所示), 以稳恒电流注入条件下的灼热桥丝式电火工品的裸桥温升为中间量, 在连续波辐射条件下实现了裸桥感应电流的定量测量, 但文献中桥丝温升与稳恒注入电流的拟合线性度不高, 特别是在注入电流幅值较小时, 这表明了红外光纤测温装置在测量如灼热桥丝式电火工品的桥丝等微小物体温度时测量误差较大, 并且也未研究电磁脉冲辐射条件下的桥丝温升如何测量。

2019 年, Lu Xinfu^[44] 等人针对红外光纤测温系统误差大的问题, 提出了利用 GaAs 光纤测温装置对灼热桥丝式电火工品裸桥温度测试的方法, 分析了稳恒电流注入或连续波辐射条件下注入电流或辐射场强与裸桥温升之间的关系, 可为含灼热桥丝式电火工品的弹药系统高水平场强辐射敏感度测试提供基础, 然而该研究也未解决电磁脉冲条件下的桥丝温升测量难题, 其方法不能直接推广应用于电磁脉冲条件下的灼热桥丝式电火工品感度测试和安

Fig. 10 Test set up for measurement of induced current^[41]图 10 感应电流测试系统^[41]Fig. 11 Infrared fiber optic temperature measurement system^[43]图 11 红外光纤测温系统^[43]

全性评估。

2020年,赵团^[45]等人搭建了感应电流定量测试系统,将光纤测温装置、功率辐射源、灼热桥丝式电火工品或含灼热桥丝式电火工品的火箭弹按照图12的试验系统布局,在10 kHz~18 GHz的频率范围内,选取了多个典型频点,在实验室能达到的场强水平下测量了灼热桥丝式电火工品桥丝上的感应电流,通过线性外推法计算了受试电火工品安全电流所对应的连续波辐射场场强值,并根据GJB1389A-2005中要求的场强水平对含灼热桥丝式电火工品的火箭弹的在射频辐射安全性进行了评估,但该研究同样没有对实装灼热桥丝式电火工品在电磁脉冲辐射下的安全性测试评估方法进行说明。

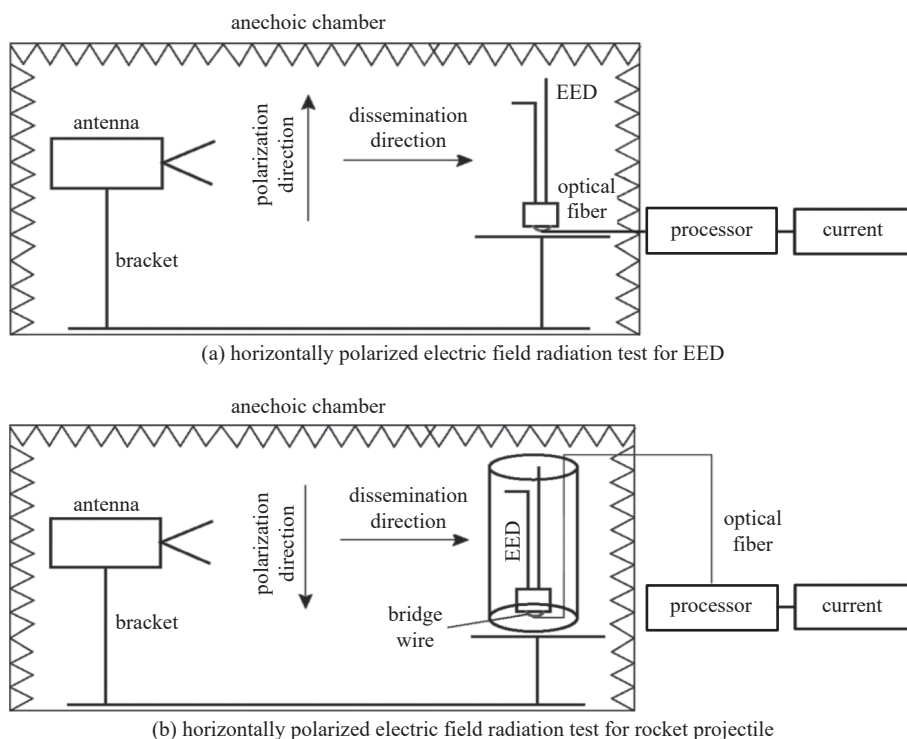


Fig. 12 Radiation test layout diagram^[45]

图12 辐照试验布局示意图^[45]

2021年,Wang Biao^[46]等人基于GaAs光纤测温装置提出了强场电磁环境下灼热桥丝式电火工品电磁安全性等效测试方法(试验系统如图13所示),该研究首先在稳恒电流注入条件下测试了受试灼热桥丝式电火工品的50%发火电流 I_{50} ,然后利用光纤测温装置测量了裸桥在恒流注入条件下的温升系数 k_1 ,并结合二者求得裸桥的等效发火温度 T_1 ,最后利用裸桥的等效发火温度对辐射条件下的等效临界发火场强进行求解,并与试验测得的50%发火场强作对比,其测试原理如下。

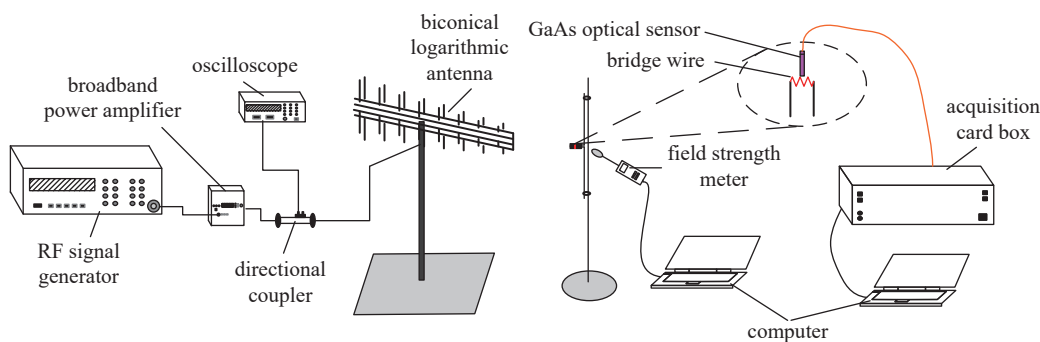


Fig. 13 Continuous wave test system

图13 连续波试验系统

根据热传导理论,裸桥的热平衡温度与激励电流必有以下关系

$$T - T_0 = k_1 I \tag{7}$$

式中: T 为桥丝温度, T_0 为环境温度, k_1 为恒流注入条件下的裸桥温升系数。

根据式(7)可得裸桥在受试灼热桥丝式电火工品的 50% 恒定发火电流 I_{50} 注入下, 其等效发火温度 T_1 为:

$$T_1 - T_0 = k_1 I_{50} \quad (8)$$

而在连续波辐射下, 辐射场强与裸桥的温升必有关系:

$$T - T_0 = k_f E^2 \quad (9)$$

式中: k_f 为频率为 f 的辐射场对应的裸桥温升系数, E 为辐射场的场强有效值。

根据热点火理论, 灼热桥丝式电火工品的发火与否直接取决于桥丝温度, 而根据式(8)和式(9), 可求得在频率为 f 的连续波辐射下, 灼热桥丝式电火工品的等效发火场强有效值为

$$E_f = \sqrt{\frac{T_1 - T_0}{k_f}} \quad (10)$$

据上述分析可知, 通过测试灼热桥丝式电火工品的 50% 恒定发火电流, 然后通过测温装置测得恒流注入和连续波辐射条件下的裸桥温升系数 k_1 和 k_f , 根据式(8)和(10)便可得到灼热桥丝式电火工品在频率为 f 的连续波辐射下的临界发火场强 E_f , 研究结果显示等效法与全电平辐照法的误差仅有 -0.55 dB, 表明该方法准确度较高, 该方法本质上是采用裸桥等效发火温度作为评判标准, 与传统将裸桥温升作为中间量的方法相比, 其弥补了裸桥与带药状态下的桥丝散热状态不同而引入的误差, 故准确性高。

2021 年, 该团队又将文献 [46] 的方法直接引入到脉冲条件下的灼热桥丝式电火工品安全性评估^[47], 通过在脉冲注入条件下建立桥丝温升与脉冲参数之间的关系, 等效评估灼热桥丝式电火工品的安全性(试验设置如图 14 所示), 然而 GaAs 光纤测温装置的响应时间与灼热桥丝式电火工品桥丝的响应时间有数量级的差别, 测温装置无法实时测量脉冲激励下的桥丝温升, 该研究并没有分析脉冲条件下桥丝温升测量值与真实值之间的关系, 连续波辐射条件下的等效测试方法直接引入脉冲注入条件的合理性还需深入分析。

根据上述研究分析可知, 由于光纤测温相比于其他测温方法具有不可替代的优点, 目前已成为广泛发展和应用的测温解决方案, 然而采用光纤测温法来评估灼热桥丝式电火工品电磁安全性的研究仅限于稳恒电流注入、宽脉冲注入、连续波辐射激励条件, 并将桥丝在上述激励下的温升测量值直接应用于灼热桥丝式电火工品的电磁安全性评估, 相关研究表明准确性较高, 这是因为在以上激励下桥丝均能达到热平衡状态, 测温结果准确, 当外部电磁环境为高功率微波电磁脉冲时, 桥丝的温升响应与窄脉冲(脉宽小于 μs 级)注入等效^[48], 此时桥丝无法达到热平衡状态, 而目前适合灼热桥丝式电火工品桥丝温度测量的光纤测温装置响应时间在亚秒级, 窄脉冲作用下无法直接对其准确测温, 对于电磁脉冲辐射条件下测温装置与灼热桥丝式电火工品响应时间有数量级的差别, 难以准确测量桥丝温升带来的灼热桥丝式电火工品电磁脉冲辐射安全性评估难题, 尚未见到公开发表的解决方案, 采用光纤测温法解决实装灼热桥丝式电火工品在强电磁环境下的电磁安全性评估问题还需深入探索。

3 结 论

由于高频下无法避免的驻波效应, 感应测试法无法满足灼热桥丝式电火工品电磁辐射安全性测试要求, 而光纤测温技术的发展为灼热桥丝式电火工品的电磁安全性评估提供了更加可靠的技术方案。本文重点分析了灼热桥丝式电火工品电磁辐射安全性评估方法, 总结了感应测试法和光纤测温法的优缺点和适用范围, 并指出光纤测温法应重点解决的关键技术: (1) 随着信息化发展和大功率用频装备的广泛使用, 灼热桥丝式电火工品所处的电磁环境愈加恶劣, 传统的感应测试法已不满足其电磁辐射安全性测试的频率要求, 提高灼热桥丝式电火工品在电磁辐射作用下安全性测试评估技术的准确性和频率适用范围是急需攻克的技术难题; (2) 将仿真软件(如 COMOSL, ANSYS 等)引入灼热桥丝式电火工品的电磁辐射效应研究是提升研究效率的有效措施, 借助软件强大的计算能力和模型库, 可以快速仿真灼热桥丝式电火工品在不同激励作用下的响应趋势和规律, 为效应试验提供一定指导作

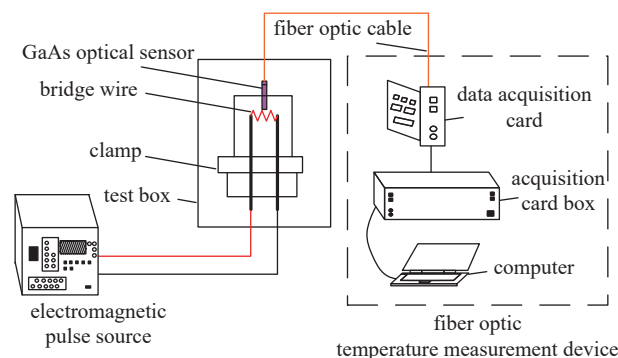


Fig. 14 Impulse test system

图 14 脉冲试验系统

用；(3)采用光纤测温装置监测桥丝在外界辐射场作用下的温升，通过外推等效评估灼热桥丝式电火工品的电磁辐射安全性是突破现有测试评估瓶颈技术的重要渠道，是实现灼热桥丝式电火工品的电磁辐射安全性评估精确化、全频化的关键举措。下一步应重点解决因测温装置与桥丝响应时间不匹配造成的窄脉冲作用下的测量误差，并提出相应的等效测试方法；(4)采用测温法对电火工品的电磁安全性进行测试评估尚存在稳恒激励下裸桥温度与实装有差异、脉冲激励下测温结果不可靠等诸多问题，安全性评估方法亟待完善。必须积极探索恶劣电磁环境下电火工品效应评价的新方法，综合考虑灼热桥丝式电火工品的桥丝温升规律和临界发火感度，建立不同激励下的发火感度交联关系，发展灼热桥丝式电火工品在电磁脉冲辐射下的安全性等效测试评估技术。

参考文献：

- [1] Zhang He, Dai Keren, Yin Qiang. Ammunition reliability against the harsh environments during the launch of an electromagnetic gun: a review[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 45322-45339.
- [2] Yang Maosong, Sun Yongwei, Zhou Lidong. Summary of electrostatic sensitivity of EED and anti-electrostatic measures[C]//Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies. 2017: 184-186.
- [3] 张旭, 马志刚, 邱立军, 等. 舰载相控阵雷达对火工品安全影响[J]. *舰船电子工程*, 2018, 38(6): 123-127. (Zhang Xu, Ma Zhigang, Qiu Lijun, et al. Effect of ship-borne phased array radar on safety of initiating explosive device[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2018, 38(6): 123-127)
- [4] Wang Biao, Sun Yongwei, Wang Xuetian. Test method for bridge wire temperature during ignition of electric explosive device[C]//Proceedings of SPIE, International Conference on Intelligent Equipment and Special Robots. 2021: 121270R.
- [5] Parate B A, Salkar Y B, Chandel S, et al. A novel method for dynamic pressure and velocity measurement related to a power cartridge using a velocity test rig for water-jet disruptor applications[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2019, 16(3): 319-342.
- [6] Cooper E F. Electro-explosive devices[J]. *IEEE Potentials*, 2000, 19(4): 19-22.
- [7] Kichouliya R, Devender T, Ramasarma V V, et al. Investigating the effects of impulse excitations on instrumented electro-explosive devices[C]//Proceedings of 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2012: 988-992.
- [8] Xu Qiu, Yang Zhuoqing, Zhang Qihuan, et al. Simulation and characterization of a thin film Au/Ni micro hot bridge-wire ignition element under capacitor discharging[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, 102: 100-110.
- [9] Dang Pengyang, Liu Jiang, Ni Debin, et al. Analysis of electro explosive performance of Al/MoO₃ bridge wire initiating explosive devices with different modulation ratio[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications. 2021: 369-372.
- [10] Lv Zhixing, Yan Nan, Bao Bingliang. Pin-pin ESD protection for electro-explosive device under severe human body ESD[J]. *Microelectronics Reliability*, 2017, 75: 37-42.
- [11] MIL-STD-1512, Electroexplosive subsystems, electrically initiated, design requirements and test methods[S].
- [12] MIL-STD-464C, Electromagnetic environmental effects requirements for systems[S].
- [13] GJB 7504-2012电磁辐射对军械危害试验方法[S]. (GJB 7504-2012 Test method for hazards of electromagnetic radiation to ordnance[S])
- [14] GJB 1389A-2005系统电磁兼容性要求[S]. (GJB 1389A-2005 Electromagnetic compatibility requirements for systems[S])
- [15] GJB 8848-2016系统电磁环境效应试验方法[S]. (GJB 8848-2016 Electromagnetic environmental effects test methods for systems[S])
- [16] Lu Xinfu, Wei Guanghui, Pan Xiaodong, et al. Dual-port pulsed differential-mode current injection method for high-level electromagnetic pulse radiated susceptibility testing[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2016, 10(5): 505-512.
- [17] 潘晓东, 魏光辉, 卢新福, 等. 差模定向注入等效替代强电磁脉冲辐射效应试验方法[J]. *电波科学学报*, 2017, 32(2): 151-160. (Pan Xiaodong, Wei Guanghui Lu Xinfu, et al. Test method of using differential mode directional injection as a substitute for high intensity electromagnetic pulse radiation[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2017, 32(2): 151-160)
- [18] 卢新福, 魏光辉, 潘晓东, 等. 用频装备强场电磁辐射效应等效试验方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(3): 755-761. (Lu Xinfu, Wei Guanghui, Pan Xiaodong, et al. High intensity electromagnetic field radiation effect equivalent test method for spectrum-dependent equipment[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(3): 755-761)
- [19] Rosenthal L A. Thermal response of bridgewires used in electroexplosive devices[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1961, 32(9): 1033-1036.
- [20] Koc S, Tinaztepe H T. A study for the effect of low level conducted periodic pulsed currents and electromagnetic environment on electro explosive device systems[C]//Proceedings of the 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2006.
- [21] 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 Zhiming. Thermal ignition theory of electric hot wire initiating devices[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2007(4): 26-30)
- [22] Ye Juan, Li Guiluan, Zhao Longfei. Quantitative evaluation for radio-frequency effects of electro-explosive device[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2015: 417-421.
- [23] Li Jinpeng, Zhou Zhongyuan, Hu Peng, et al. Calculating method for RF induced current of electric-explosive device based on Agrawal model and non-uniform transmission line[C]//Proceedings of the 2019 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments. 2019: 736-741.
- [24] Pantoja J J, Peña N, Mora N, et al. On the electromagnetic susceptibility of hot wire-based electroexplosive devices to RF sources[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(4): 754-763.

- [25] Babu A S, Mishra K K, Shetty C P, et al. Method to determine the electrical energy for ignition of electro-explosive devices[J]. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2015, 7(3): 285-288.
- [26] Wang Jun, Zhou Bin, Ye Shuqin, et al. Novel electro-explosive device incorporating a planar transient suppression diode[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, 41(9): 1416-1419.
- [27] 王可喧, 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, 20(5): 610-613. (Wang Kexuan, Bai Yingwei, Ren Wei, et al. Response rule of hot-wire EED in continuous electromagnetic environment[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2012, 20(5): 610-613)
- [28] Liu Jiankai, Zhang Yuru, Zhao Kai, et al. Simulations of standing wave effect, stop band effect, and skin effect in large-area very high frequency symmetric capacitive discharges[J]. *Plasma Science and Technology*, 2021, 23: 035401.
- [29] Li Guilian, Feng Zhang, Ma Weiyu. Study on radio-frequency damage effects of electro-explosive device[C]//Proceedings of 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2014: 980-984.
- [30] Wang Ruizhi, Tang Enling, Yang Guolai, et al. Experimental simulation of self-powered overload igniter based on Lead Zirconate Titanate[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 314: 112222.
- [31] 林强, 杜松健, 孙东, 等. 国内红外热像测温技术的研究现状及在测温节能方面的应用[J]. *石油石化节能*, 2021, 11(3): 17-20. (Lin Qiang, Du Songjian, Sun Dong, et al. Research and application of infrared thermal imaging technology in China[J]. *Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry*, 2021, 11(3): 17-20)
- [32] Zhao Yong, Chen Maoqing, Lv Riqing, et al. Small and practical optical fiber fluorescence temperature sensor[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(10): 2406-2411.
- [33] 康凯. 光纤荧光测温仪关键技术研究[D]. 北京: 中国航天科技集团公司第一研究院, 2018: 58-59. (Kang Kai. Research on the key technology of optical fiber fluorescent thermometer[D]. Beijing: The First Academy of China Aerospace Science and Technology Corporation, 2018: 58-59)
- [34] Domínguez-Flores C E, Monzón-Hernández D, Moreno-Basulto J I, et al. Real-time temperature sensor based on in-fiber Fabry-Perot interferometer embedded in a resin[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(4): 1084-1090.
- [35] Wang Botao, Niu Yanxiong, Zheng Shaowei, et al. A high temperature sensor based on sapphire fiber Fabry-Perot interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(2): 89-92.
- [36] Zou Hui, Ma Lei, Xiong Hui, et al. Fiber ring laser sensor based on Fabry-Perot cavity interferometer for temperature sensing[J]. *Laser Physics*, 2017, 28: 015102.
- [37] Duplain G, Leduc C. Smart and reliable assessment of electromagnetic environmental effects on ordnance made easy[R]. Quebec: OpSens Inc., 2014.
- [38] 马森. 高速砷化镓光纤温度传感技术及应用研究[D]. 信阳: 信阳师范学院, 2021: 23-24. (Ma Sen. Study on high-speed GaAs optical fiber temperature sensing technology and its application[D]. Xinyang: Xinyang Normal University, 2021: 23-24)
- [39] Lee K R, Bennett J E, Pinkston W H. Improved measurement techniques of bridgewire heating caused by induced electromagnetic radiation[C]//Proceedings of 1987 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 1987: 1-4.
- [40] 王韶光, 魏光辉, 陈亚洲. 电火工品电磁危害的光纤测试方法[J]. *高电压技术*, 2007, 32(5): 6-10. (Wang Shaoguang, Wei Guanghui, Chen Yazhou. Optic-fiber test method for electromagnetic hazards of EED[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 32(5): 6-10)
- [41] Kichouliya R, Devender, Ramasarma V V, et al. Hazards of electromagnetic radiation to ordnance (HERO) assessment of electro-explosive devices and validation of extrapolation method for estimation of the safety margin at HERO electromagnetic environments[C]//Proceedings of 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2011: 946-953.
- [42] 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 Qingmei, Yao Hongzhi, et al. Study on the quantitative test technique of EED induced current[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2013(5): 50-52)
- [43] Xin Liwei, Wang Tao, Tian Jinshou, et al. Induced current measurement in bridgewire EED through infrared optical fiber image bundle[C]//Proceedings of SPIE 8905, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Laser Sensing and Imaging and Applications. 2013: 890518.
- [44] Lu Xinfu, Wei Guanghui, Sun Yongwei, et al. Temperature rise test method of hot bridgewire EED under steady conditions[C]//Proceedings of 2019 IEEE 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2019: 1-4.
- [45] 赵团, 张蕊, 姚洪志, 等. 射频电磁环境中火箭弹安全性评估[J]. *兵工学报*, 2020, 41(s2): 299-304. (Zhao Tuan, Zhang Rui, Yao Hongzhi, et al. Estimation on the safety of rocket projectile in RF electromagnetic environment[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(s2): 299-304)
- [46] Wang Biao, Sun Yongwei, Wang Xuetian, et al. Equivalent test method for strong electromagnetic field radiation effect of EED[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2021, 2021: 7331428.
- [47] Wang Biao, Sun Yongwei, Wei Guanghui, et al. Research on test method of ignition temperature of electric explosive device under electromagnetic pulse[J]. *Radioengineering*, 2021, 30(3): 510-516.
- [48] 祁超, 魏光辉, 潘晓东, 等. 电磁脉冲串重复率变化对数字通信电台的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 103207. (Qi Chao, Wei Guanghui, Pan Xiaodong, et al. Effect of variation of electromagnetic pulse repetition rate on digital communication stations[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 103207)