

文章编号: 1006-9941(2017)11-0954-10

电火工品电磁环境适应性的研究进展及展望

王军¹, 李勇², 周彬¹, 陈厚和¹, 杜伟强¹, 范晓巍¹

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 电火工品作为武器系统的点火源、引爆源,是影响武器系统安全性和可靠性的重要因素之一。从电火工品换能元钝感化设计和防护器件的选用角度出发,综述了近年来电火工品电磁兼容性设计的研究进展。介绍了提高电火工品抗电磁环境能力的两种方法(增加防护器件来吸收或旁路从电磁环境中耦合的能量和设计新型钝感电火工品)。认为采用现代微电子工艺,设计制备集成式抗电磁干扰电火工品是大规模制备具有较高一致性和可靠性的点火换能元芯片的可行方法。

关键词: 火工品; 复杂电磁环境; 抗射频; 抗静电**中图分类号:** TJ45**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.11.011

1 引言

随着现代战场武器系统中电子和电子系统的日益增多,战场电磁环境的复杂性也随之增强。电子系统工作过程中,不可避免会产生一定的电磁波。一方面,电磁波会造成电子设备之间的电磁兼容性问题;另一方面,电磁辐射能量通过天线、孔缝和电缆等途径耦合进入武器系统内部,轻则引起武器系统性能的退化,严重之时会导致火工品误爆造成人员伤亡等事故。实验表明^[1-2],处于电磁辐射环境中的桥丝式火工品,其敏感频率只与脚线长度有关,不受火工品开路或短路状态的影响;在敏感频率下,安全电流^[3]为 25 mA 的桥丝式火工品耦合的最大感应电流可达 160 mA,已远远超出了其安全电流规定值(25 mA)。此外,桥丝式火工品^[4]在 20 kV(500 pF, 5 kΩ)以上的静电冲击作用下,桥丝会发生形变、电阻显著下降、温度上升并会影响与其接触的药剂。半导体桥火工品^[5]在受到静电冲击后,桥区尖角处的硅材料会发生汽化,导致桥区变得钝感并影响其发火性能。为解决电火工品在电磁环境下的安全性和可靠性问题,美国从 20 世纪 60 年代起就开始对武器系统及火工元件的抗电磁干扰能力制定了一系列标准,MIL-STD-461C^[6]将电磁环境的内

涵定义为电磁辐射(EMR)、电磁干扰(EMI)、电磁脉冲(EMP)、静电(ESD)、雷电(LE)和电源瞬变(PST),规定引信、军械系统和航天飞行器用火工装置在上述六种电磁环境中均需保证安全。

电火工品种类繁多,依据所采用的电发火件,电火工品通常可分为桥丝、桥带、半导体桥、爆炸桥丝和爆炸箔等。其中爆炸桥丝和爆炸箔是高压电火工品,本身较为钝感并具有良好的电磁防护性能。但是需要上千伏的高压来激发以实现发火,受武器系统电源、弹上电爆系统可用空间和成本因素的限制,其大规模应用仍存在一定的局限性。与爆炸桥丝和爆炸箔相比,桥丝、桥带和半导体桥电火工品具有体积小、成本低和发火能量低等优势,并在武器系统中有相当广泛的应用。但是低发火能量也导致它们对电磁环境更加敏感,尤其是面对静电和电磁辐射(射频)两种电磁环境时。因此,如何提高桥丝、桥带和半导体桥电火工品的抗静电和抗射频能力就是研究者所要面临的问题。目前上述三种电火工品的抗静电和抗射频设计方法主要包括采用综合防护加固技术(分立器件防护型设计和集成器件型防护设计)和设计新型钝感型电火工品。本文从上述两个方面对国内外电火工品的防静电和防射频技术的研究现状进行分析和讨论。

2 电火工品电磁兼容性设计方法

电火工品的电磁兼容性设计方法包括综合防护加固技术(分立器件防护型设计和集成器件型防护设计)和新型钝感型电火工品的设计。综合防护加固技

收稿日期: 2017-05-29; 修回日期: 2017-08-31

作者简介: 王军(1991-),男,博士在读,主要从事电火工品电磁兼容性研究。e-mail:314103002325@njjust.edu.cn

通信联系人: 周彬(1971-),女,副研究员,主要从事半导体桥火工品研究。e-mail:zhoubinust@126.com

术是通过在电火工品上增加衰减器等防护器件,来吸收或旁路电火工品从电磁场中耦合的能量,使换能元上耦合的能量低于临界发火能量,从而保证电火工品的安全。由于射频和静电对电火工品造成的损伤机理不同,一般分别采用不同的防护型器件来进行电磁防护。对于射频环境,耦合入电火工品的能量一般是以热积累的形式造成损伤^[7],常用加固器件有铁氧体材料、陶瓷电容和负温度系数热敏电阻等。而对于静电环境,其一般是大电流短脉冲信号,瞬间产生的强电场会造成电火工品的局部击穿,常用防护器件有齐纳二极管、瞬态电压抑制二极管、压敏电阻和肖特基二极管等。而新型钝感型电火工品的设计是通过改变换能元的材料、形状或设计新型换能元的方式来实现静电和射频加固的要求。

2.1 综合防护加固技术

2.1.1 分立器件防护型设计

2.1.1.1 铁氧体材料和电容组合型

铁氧体材料是一种烧结形成的金属氧化物,常用于电源线和抑制信号线来吸收高频信号和静电放电脉冲等干扰信号,其特点为低频电磁环境下呈低阻抗特性,而在高频电磁环境下呈高阻抗特性。一般将其与换能元串联使用,当电火工品处于低频电磁环境时,铁氧体材料呈现低阻特性,发火信号正常流过脚线,不会对电火工品的正常发火造成影响。而随着射频频率的升高,铁氧体磁珠的阻抗也在不断增加,高频电流通过铁氧体材料的涡流损耗以热的形式耗散掉,极大地衰减了到达换能元上的能量,从而保证了电火工品在高频电磁环境下的安全性。

1958年,Maurice等^[8]首次将铁氧体材料填充在脚线周围(结构如图1所示),用来吸收和衰减脚线中感应的高频电流,实现了独脚桥丝式电火工的射频加固。但是在加工过程中,发现铁氧体材料的填充、接触点的密封及焊接和体积等问题都大大增加了加工的难度和成本。随着制造技术的进步,逐渐出现了铁氧体磁珠等标准化电子器件,这就大大简化了铁氧体材料的应用。国内于2009年^[9]首次将铁氧体磁珠用于低发火能量半导体桥火工品的射频加固,在连续波注入条件下,发现片式磁珠能将半导体桥的全发火功率从13 W提高到17 W。随后,任炜等^[3]通过电磁辐射效应测试系统测试发现桥丝式火工品在敏感频率附近的感应电流(160 mA)极大的超过该火工品所允许的安全电流(25 mA),在两根脚线上分别串联两个层叠片式铁氧体磁珠后,火工品上的感应电流衰减了30%。

上述研究表明,不管射频能量是以辐射耦合还是传导耦合的方式馈入电火工品中,铁氧体磁珠均能够有效衰减射频环境下耦合的能量。

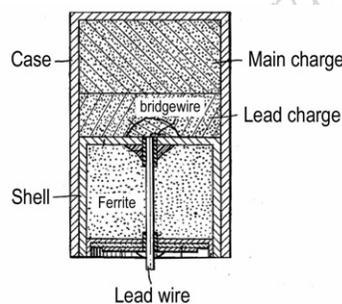


图1 铁氧体材料和电容防护型桥丝式火工品^[8]

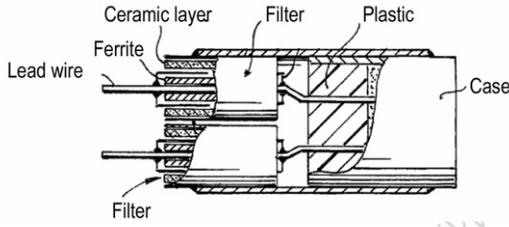
Fig.1 Bridge-wire initiator with integral ferrite materials and capacitive for attenuating RF^[8]

电容作为滤波器中常用器件,具有体积小成本低廉等优点,并联于换能元两端时,其容抗是频率的函数($1/\omega C$);设换能元电阻为 R ,换能元支路和电容支路的分电流之比则由它们的阻抗大小来决定。处于低频电磁环境时, $\omega \ll 1/RC$,电容支路的阻抗远大于换能元支路,此时电流大多流经换能元支路,电容不会对正常发火信号造成影响。而处于高频电磁环境时, $\omega \gg 1/RC$,电容支路的阻抗远小于换能元支路,射频产生的交流信号大多从电容支路流走,从而保证了换能元的安全。因此,通过选择一定容值的电容,可以对特定频段的射频信号产生截止效应。

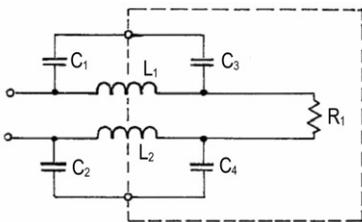
1999年,Novotney等^[10]将电容用于半导体桥的射频加固,测试了不同频率的连续波(低于1 GHz/18 W)和脉冲波(2.7、5.4、16 GHz/6 W和33 GHz/6 W)注入条件下半导体桥火工品的响应,发现所有样品在电容的保护下均未发火。2002年,King等^[11]将电容用于半导体桥的静电加固,基于Fisher静电放电模型,测试了1 μF 陶瓷电容的静电防护效果,实验表明电容有效抵抗了静电的冲击且保证了静电冲击后半导体桥临界发火电压的一致性。2012年,南京理工大学任钢^[12]采用贴片电容(101电容和104电容)对半导体桥火工品进行射频加固,射频注入实验表明电容可以将半导体桥的抗射频功率从14.15 W提升到20 W,且并联的电容不会对半导体桥的电爆性能造成影响。

除分别使用上述两种将防护器件外,还可将两者进行组合,使其既具有良好的射频防护性能又具有一定的静电防护性能。Shores等^[13]利用铁氧体磁珠和

电容构造了 π 型滤波器, 并将其引入到桥丝式电火工品中, 其结构和等效电路如图 2 所示, 构成的 π 型滤波器能滤除特定波段的射频。Henderson 等^[14] 基于印刷电路板工艺, 将换能元、铁氧体磁珠和电容进行了板上集成设计, 其结构和等效电路如图 3 所示。在 10 ~ 100 MHz 的射频注入条件下, 测试结果表明防护前



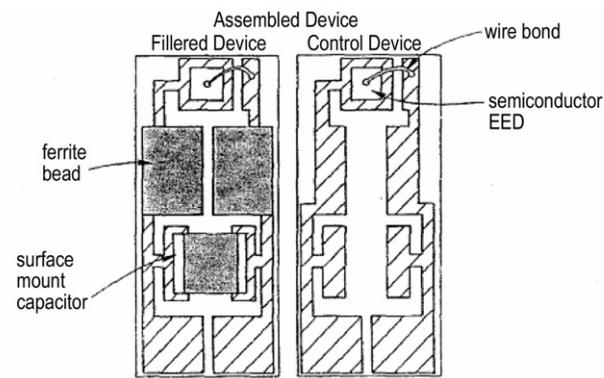
a. cross-sectional view of the squib device



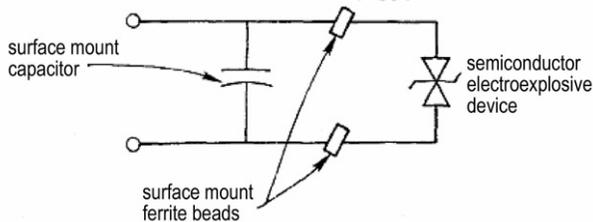
b. schematic diagram of the equivalent circuit of the device

图 2 低通滤波器防护型桥丝式火工品^[13]

Fig. 2 Low-pass filter for Bridge-wire initiator^[13]



a. layout design and assemble device



b. schematic diagram for hybrid filter and electroexplosive circuit

图 3 集成铁氧体磁珠和贴片电容防护型火工品^[14]

Fig. 3 An RF-insensitive hybrid electroexplosive device incorporating an integral filter^[14]

后芯片表面温度明显降低。上述研究结果均表明了铁氧体磁珠和电容组合使用的有效性。

目前所采用的铁氧体磁珠主要为层叠片式铁氧体磁珠和线圈式铁氧体磁珠, 前者需要设计一定的封装结构将其封装于电火工品内部, 后者只需将其串在电火工品脚线上即可, 因此实际使用过程中一般根据电火工品的结构来选择不同类型的磁珠。由于铁氧体磁珠的射频抑制效果与其体积呈正比, 所以当需要对高频射频进行防护时, 其体积成为制约其使用的关键因素。此时, 将贴片电容与其组合使用, 恰能弥补磁珠高频防护效果不佳的缺点, 已有研究结果表明铁氧体磁珠和电容组合防护的方法能够有效提高桥丝式或半导体桥电火工品的抗射频能力, 但是其抗静电能力还有待进一步验证。

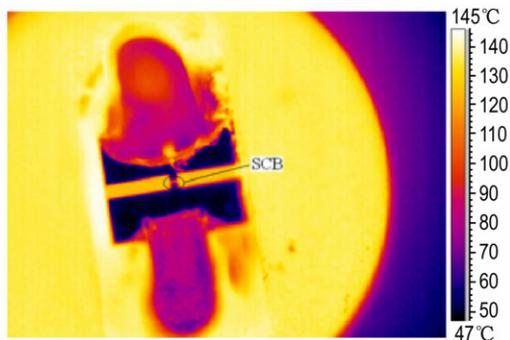
2.1.1.2 负温度系数热敏电阻

负温度系数热敏电阻是一类对热敏感的电子器件, 常温时呈高阻特性, 且阻值随着外界温度的升高而呈跃阶式减小, 一般将其并联在换能元两端且与陶瓷塞底座紧密相连。电火工品处于射频环境中时, 脚线耦合的能量在换能元上产生热积累效应, 热量不断向四周传播, 此时紧贴陶瓷基底的负温度系数热敏电阻吸收热量阻值迅速降低, 分走电流的比例与热敏电阻和换能元之间的电阻变化呈一定关系, 当陶瓷基底温度不再上升时, 整个系统达到动态平衡, 此时换能元支路的能量大大衰减, 从而保证了换能元的安全。而对于正常的发火信号而言, 一般为短脉冲(几十毫秒内)信号, 火工品的爆发过程可以当作绝热状态, 此时热敏电阻的阻值还来不及发生变化, 因此不会对电火工品的发火性能造成影响。

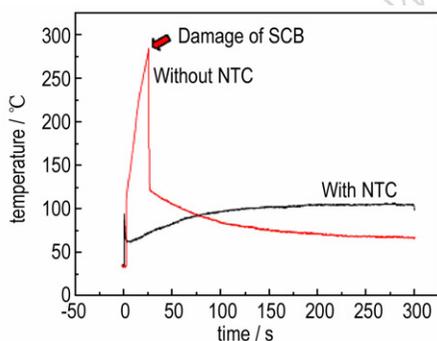
CHEN^[15] 和李勇^[16] 等首次将热敏电阻用于半导体桥火工品进行射频加固, 射频注入实验表明并联负温度系数热敏电阻之前, 半导体桥的全发火射频功率为 17.1 W, 并联负温度系数热敏电阻后, 同等条件下的半导体桥均不发火; 安全电流实验表明^[15], 负温度系数热敏电阻能有效分走 59% 的回路电流, 大大降低了换能元上的能量, 防护效果显著, 其热成像图和芯片桥区温度变化如图 4 所示。

试验表明负温度系数热敏电阻的使用能够有效提高电火工品的抗射频能力, 同时其具有体积小、可重复使用和易于封装等优点。但是由于该器件为温度敏感型器件, 受环境温度影响较大, 因此无法适应极端气候条件。在常温条件下使用时, 仅适用于具有较好传热效果的基座(如陶瓷基座等), 且在封装过程中需要

使用导热性良好的固化胶进行粘结,这在一定程度上限制了其应用。



a. thermal image of SCB



b. temperature-time variation of SCB film

图4 NTC 热敏电阻用于半导体桥射频防护^[15]

Fig. 4 EMC protection of SCB igniter by using SMD-based NTC thermistors^[15]

2.1.1.3 齐纳二极管

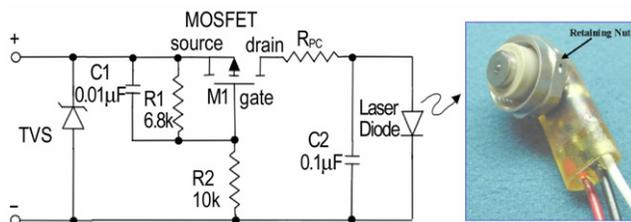
齐纳二极管又称稳压二极管,其常用于电子电路中,用来保护电子线路中的精密元器件。将齐纳二极管并联在换能元两端,利用PN结的反向击穿原理来实现静电的防护,当静电脉冲通过脚线传至电火工品上时,齐纳二极管很快响应并被击穿形成低阻抗通路。该支路的阻抗远低于换能元支路阻抗,因此大量的静电能量从二极管支路流走,起到保护换能元的目的;当静电脉冲消失后,齐纳二极管又能迅速恢复到初始高阻状态,不对发火信号造成影响。利用这种能对静电多次响应的防护器件,可有效提高电火工品的抗静电能力。

1999年,Novotney等^[10]将齐纳二极管并联至低发火能量半导体桥(全发火能量低于0.3 mJ)两端,静电放电测试结果表明并联齐纳二极管后的半导体桥能够承受25 kV(500 pF电容串联150 Ω电阻放电)的静电冲击而不发火,验证了齐纳二极管静电防护的有效性。为进一步探究不同击穿电压齐纳二极管的静电

防护效果,King等^[11]测试了击穿电压为6,8,14,51 V的齐纳二极管的静电加固效果,基于Fisher静电放电模型,结果表明击穿电压为6,8,14 V的齐纳二极管能够有效防护静电能量的冲击,而击穿电压为51 V的齐纳二极管保护不能起到防护效果。同时,电容放电发火试验表明击穿电压为6 V和8 V的齐纳二极管会导致半导体桥不发火或发火时间延迟;击穿电压为14 V的齐纳二极管则不会影响半导体桥的发火。上述研究一方面表明齐纳二极管抗静电能量冲击的有效性,另一方面表明齐纳二极管的器件参数也会对静电防护效果产生影响,表现为当齐纳二极管击穿电压太低时,正常发火条件下,齐纳二极管很容易被击穿并分走能量,从而造成换能元的激发能量不足,爆发失败;而当齐纳二极管击穿电压太高时,在静电条件下又无法起到防护效果。因此在齐纳二极管的具体使用过程中时,需要根据电火工品的临界发火能量来选择合适的器件参数进行静电加固。

2.1.1.4 瞬态电压抑制二极管

瞬态电压抑制二极管又称 Transient Voltage Suppressor(TVS)二极管,其防护原理与齐纳二极管类似,也是利用其击穿特性进行静电防护,其优点为更快的响应速度(亚纳秒级)和能承受更大的浪涌电压。2003年,Sandia实验室的Weinlein等^[17]将TVS二极管和场效应管进行了集成,用于激光火工品的静电防护,电路结构如图5所示。以Fisher^[18]静电模型为测试条件,发现并联的TVS二极管可以将激光点火器上的峰值电流从120 A降至3.5 A以下。而场效应管可以进一步阻止电磁辐射引起的低压直流电对激光点火器造成的损伤。



a. equivalent circuit of laser

b. laser diode

initiator with an integrated circuit

图5 激光火工品的静电防护^[17]

Fig. 5 Electrostatic discharge (ESD) protection for a laser diode ignited actuator^[17]

国内对于TVS二极管最早报道出现于2012年,任钢^[12]采用TVS二极管对半导体桥进行射频和静电

加固。射频注入实验表明,经过 TVS 二极管防护后,全发火功率为 14.15 W 的半导体桥火工品在 20 W 功率注入下其发火百分数为 16.7%,抗射频能力得到明显提高;静电实验表明并联 TVS 二极管后的半导体桥能够经受 25 kV(500 pF 电容串联 500 Ω 电阻放电)的静电冲击;为进一步研究 TVS 二极管的静电防护能力,左成林^[19]采用了更为苛刻的静电放电条件(回路不串联放电电阻)进行研究,结果表明未并联 TVS 二极管前,SCB 在 8 kV(10000 pF 电容不串电阻放电)条件下全发火;并联 TVS 二极管后,即使电压升高到 9 kV,SCB 也未出现发火现象。褚恩义^[20-21]测试了脉冲电磁环境和连续电磁环境下 TVS 二极管对电热火工品的电磁加固效果,结果表明 TVS 二极管能够将电热火工品的抗脉冲电磁波能力从 35 kV 提升到 65 kV,对感应电流(敏感频率处)的衰减达 50%。

由此可见,TVS 二极管能够有效提高半导体桥的抗静电能力,具有的容抗特性也使得其具有优良的射频防护效果。但是同样,在具体使用过程中也需要考虑器件参数和电火工品临界发火能量的匹配问题。

2.1.1.5 压敏电阻

压敏电阻作为静电防护器件,其防护原理与齐纳二极管和 TVS 二极管类似。南京理工大学的陈飞^[5]和杜培康^[22-23]首次采用压敏电阻对半导体桥火工品进行静电和射频加固,静电实验表明压敏电阻能够使半导体桥的抗静电能力从国军标(即 25 kV 放电电压通过 500 pF 电容串联 5000 Ω 电阻放电)提高到美军标标准(即 25 kV 放电电压通过 500 pF 电容串联 500 Ω 电阻放电)。射频注入实验表明,全发火射频功率为 14.15 W 的半导体桥火工品在并联压敏电阻后,即使注入 20 W 的射频能量也不发火。试验表明,压敏电阻具有良好的静电和射频防护性能;但是在实际使用过程中,发现压敏电阻的非线性特性较差,动态电阻变化较大,低电压时漏电流较大,因此容易出现老化和防护失效的问题。

由上述五种分立器件防护型设计方法的介绍可以看出国内外均对电火工品的电磁兼容性设计做出了一定的探索和研究。研究了各类防护器件的防护效果和防护器件参数对防护效果的影响规律,均表明了防护器件的有效性。对于分立型器件而言,其具有易于组合、选择种类多和选择参数范围广等优点;但受限于体积等因素,往往需要对火工品的结构做出一定改变才能进行一体化封装,这增加了加工的复杂程度。目前来看,针对射频环境可采用铁氧体磁珠、电容、负温度

系数热敏电阻、TVS 二极管和压敏电阻来进行射频加固;针对静电环境可采用电容、齐纳二极管、TVS 二极管和压敏电阻来进行静电加固。发现电容、TVS 二极管和压敏电阻既具有抗静电能力又具有抗射频能力,可优先作为防护器件的优选方案,但是器件参数的选择需要与电火工品的临界发火能量进行匹配。在实际使用过程中,也可根据火工品的结构特点进行选择组合上述器件以实现电火工品的电磁加固目的。

2.1.2 集成器件型防护设计

上述电火工品的电磁兼容性设计均采用了在火工品内部外置防护器件来对桥丝式或半导体桥火工品进行静电或射频加固,随着加工工艺和技术水平的提高,国外研究者提出了将防护器件与换能元进行芯片级集成设计的思路,并主要针对金属桥式和半导体桥火工品进行了一系列集成型防护设计,其防护原理与分立型器件型防护设计基本一致,利用微纳加工工艺实现了防护器件和换能元的有效集成,具有体积小、一致性高、成本低和易于大规模制备等优势。

1990 年,Baginski 等^[24]制备了一种具有 MOS 电容结构的镍桥丝点火芯片。该芯片由 N 型硅基层、二氧化硅氧化层、MOS 电容(1250 pF)层和金属换能元组成,结构如图 6 所示。连续波注入条件下发现 MOS 电容对高频(大于 90MHz)的衰减率达 99%,防护效果显著;该设计是最早将电容集成在芯片上的电火工品,由于采用硅作为加工材料,大大减少了换能元芯片的体积和制作过程的复杂性,提高了点火性能的一致性。但是,由于点火芯片体积有限,其 MOS 电容的容值很难做到 1 μF 及以上的级别,所以无法对低频电磁波产生有效滤波。

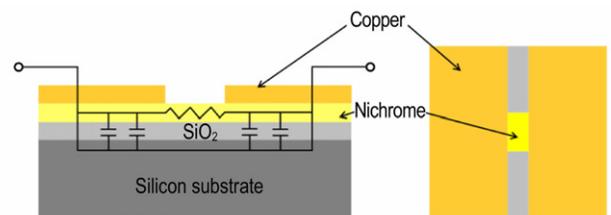


图 6 MOS 电容防护结构型镍桥丝火工品^[24]

Fig. 6 Schematic representation of MOS structure nickel bridge-wire initiator^[24]

随后,SCB 公司的 Hartman 等^[25]首次将齐纳二极管集成到了半导体桥芯片上,其结构如图 7 所示。采用微电子制作工艺,在半导体桥芯片的基础上,加工一个与桥区形成并联结构的齐纳二极管用来提高半导

体桥的抗静电性能。该专利首次将齐纳二极管与半导体桥火工品进行了集成式设计,提高了火工品的集成度和抗静电能力,但是该设计只集成了一个单向齐纳二极管,因此只能对回路中一个方向的静电脉冲起到防护效果,且该专利中并未披露其实际抗静电效果。

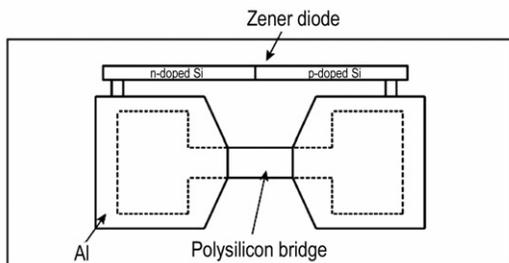


图7 齐纳二极管防护型半导体桥火工品^[25]

Fig.7 Zener diode for protection of semiconductor bridge initiator^[25]

2001年, Baginski^[26]首次将肖特基二极管和金属桥进行了集成设计,利用肖特基二极管的击穿特性来进行静电加固,其芯片横截面和实物俯视图如图8所示。该点火芯片最上层为金属层,用于形成金属桥区和接触电极;对电极下的二氧化硅层进行刻蚀,形成两个三角形窗口并覆盖金属铝,此时金属-硅接触形成肖特基二极管,两个肖特基二极管与金属钯桥形成并联结构。测试表明该芯片除了具有低发火能量的特性(2 $\mu\text{F}/30\text{V}$)外,还具有优良的抗静电性能。静电放电实验表明点火芯片能够经受25 kV(充电电容150 pF,放电电阻150 Ω)的静电放电冲击而不发火。

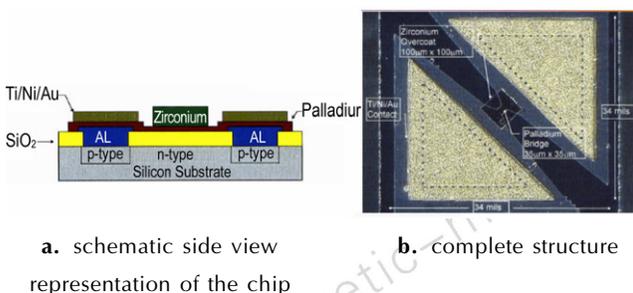


图8 肖特基二极管防护型钯桥火工品^[26]

Fig.8 Schottky diodes for protection of Pa-bridge igniter^[26]

随着加工工艺的进步,2008年, Martinez-Tovar等^[27]设计了另外一种基于齐纳二极管的点火芯片,其结构如图9所示。该点火芯片的结构与常见芯片差异较大,起始材料为P型硅,经过一系列加工形成了一个中间带有通孔的三维结构。中心通孔用于填充起爆药,圆孔内壁为多晶硅组成的圆形桥区,电极处于上下

两个表面,并用于形成背靠背结构的齐纳二极管,齐纳二极管与多晶硅桥区呈并联结构,当有静电冲击时,齐纳二极管响应起到防护作用。该设计的优势在于将中心通孔式桥型设计和防护器件进行了结合,由于中心桥区的体积比平面结构有更多可控参量,使得芯片的电阻能够得到更加精确的控制;此外,与平面压药结构相比较,该结构在装药过程中可以观察到桥区和药剂的接触情况并更好的控制装药。

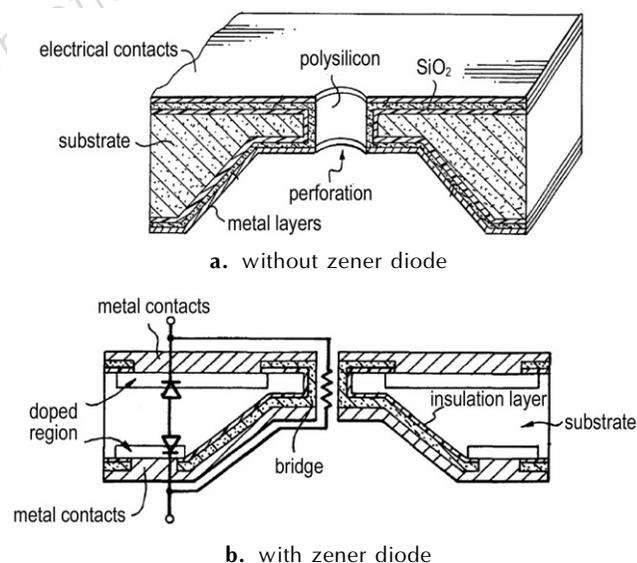


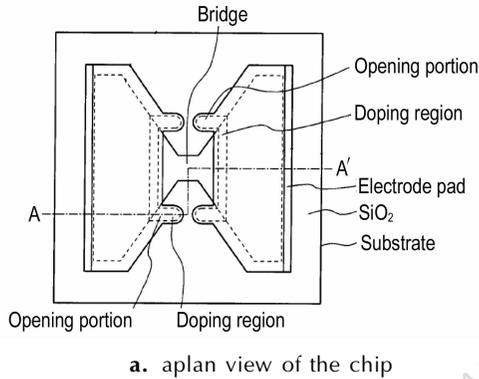
图9 齐纳二极管防护型火工品^[27]

Fig.9 Zener diode for protection of integrated initiator^[27]

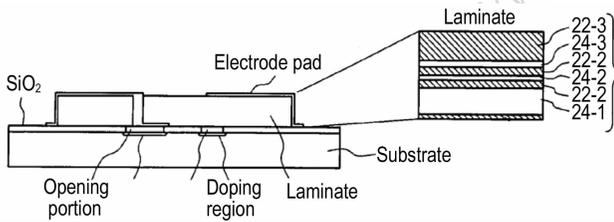
2010年, Maeda等^[28]设计了另外一种带有齐纳二极管的多层复合含能薄膜点火芯片,其结构图10所示,以硅衬底为基底并氧化一薄层二氧化硅,通过在二氧化硅薄层上进行选择性刻蚀,并注入一定浓度杂质形成p型半导体,构成PN结的结构,最后用金属封闭两个刻蚀出的窗口,形成两个串联齐纳二极管,并和桥区形成并联结构,使该点火芯片具有抗静电的能力。此外,桥区上表面增加的含能复合薄膜也大大提高了点火芯片的点火输出能力。

与国外研究相比,目前国内关于点火芯片集成防护式设计研究较少,只有上海交通大学^[29]在2008年提出了一种基于硅CMOS工艺的半导体桥芯片系统,其结构如图11所示。该设计利用CMOS工艺,将半导体桥、CMOS开关、肖特基二极管以及MOS电容集成到一个芯片,并接入到发火控制系统中,以实现基础的信息化控制功能;但在该设计中的肖特基二极管为单向防护器件,对静电的防护有方向的选择性,在实际使用中会造成诸多不便。此外,与一般换能元芯片比

较,该芯片体积过大(1 cm²),无法与现有火工器件的尺寸进行匹配,因此只停留在了版图设计层面。



a. aplan view of the chip



b. section view of the chip

图 10 齐纳二极管防护性多层复合膜点火器^[28]

Fig. 10 Multi-layer composite films semiconductor bridge device including zener diode for ESD protection^[28]

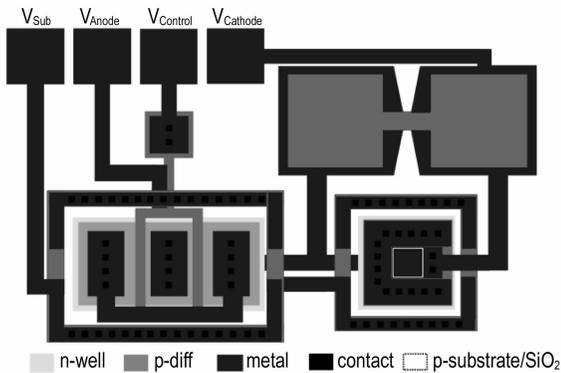


图 11 肖特基二极管防护型半导体桥型点火器^[29]

Fig. 11 Schottky diodes for protection of semiconductor bridge igniter^[29]

由此可见,国外对金属桥和半导体桥型电火工品的集成器件型防护设计进行了较多研究。研究内容包括不同防护器件的加工工艺、版图设计和实际防护效果验证等。通过借鉴分立器件防护性设计中所使用的半导体器件和参数,采用微电子加工工艺制备出 MOS 电容、齐纳二极管和肖特基二极管等基于半导体材料构成的器件来进行抗电磁加固。与分立器件型防护设计相比,集成式设计具有体积小、点火可靠性高、加工简便、点火一致性高和能够大规模制备等优点,是未来

电火工品电磁兼容性设计发展的思路与方向。但是受加工工艺的限制,有些分立型器件(如 TVS 二极管)还不能做到片上集成,因此集成芯片式设计所能选择的防护器件类型较少,目前可见的报道只有齐纳二极管、电容和肖特基二极管。此外,在微加工过程中,半导体材料的寄生效应无可避免,因此在电磁环境中,耦合的能量并不是百分百地被旁路,也会有部分被吸收并转化为热量从而降低火工品的安全性。与国外相比较,国内还需进一步研究和探索电火工品的集成式设计,包括制备工艺、参数设计、理论基础、防护机理及其应用等方面。

2.2 新型钝感型电火工品设计

除了采用上述综合防护加固技术外,通过改变桥区形状、设计新型钝感电火工品也是电火工品电磁兼容性设计的方法之一。

Baginski 等^[30]通过改变桥区的形状设计了一种对射频钝感的非线性电阻电火工品,其结构如图 12 所示。通过改变电极和桥区形状来控制电阻分配的比例,当射频或静电能量耦合入火工品时,大部分能量会被两边高阻值的电阻吸收和耗散掉,从而保证了桥区处于相对较低温度。虽然该设计提高了金属薄膜式火工品的射频静电防护能力,但是在实际使用过程中,点火信号的周期必须足够长才能实现可靠点火,这限制了其的应用。

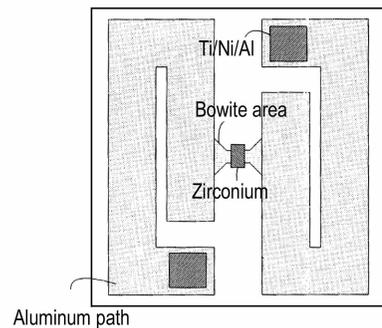


图 12 蛇形电阻防护型桥丝式点火器^[30]

Fig. 12 Bridge-wire initiator with protection of non-linear resistances^[30]

除了采用改变桥区形状外,国外研究者还设计了不同发火原理和电磁加固原理的新型钝感电火工品。Baginski 等^[31-32]于 1993 年和 2008 设计了两种 PN 结结构的点火芯片,结构分别如图 13 和 14 所示。其点火原理与常规火工品不同,主要依靠 PN 结发生雪崩击穿产生的热高温等离子体进行点火。图 13 芯片由两个背靠背的 PN 结组成,电极分别在上下表面,呈

平面结构;芯片处于射频环境时,PN 结展现出的容抗特性使得耦合入芯片的电压和电流总存在 90° 的相位差,芯片不产生热耗散;当有静电冲击芯片时,PN 结发生齐纳击穿,能量迅速通过芯片不造成损伤,且击穿后很快恢复初始状态,表现出良好的静电射频防护效果。实验表明,PN 结电容为 420 pF 的点火芯片,在 $10\sim 450\text{ MHz}$ 的射频信号注入下,芯片表面最高温升仅为 $6.2\text{ }^\circ\text{C}$;在 32 kV (500 pF 电容串联 $5000\ \Omega$ 电阻放电)的静电冲击下保证安全。

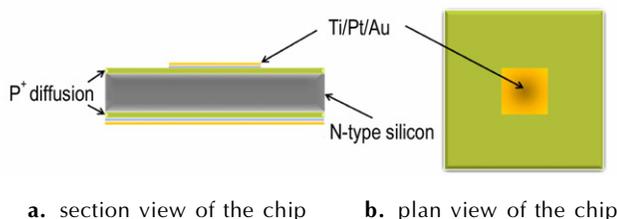


图 13 PN 结型半导体火工品^[31]

Fig. 13 Schematic representation of PN junction igniter^[31]

另外一种 PN 结型的芯片如图 14 所示。通过在硅衬底上重掺杂形成两个串联 PN 结来进行射频和静电加固,其防护原理和发火原理与上面 PN 结型半导体火工品一致。静电实验表明,击穿电压为 500 V 的点火芯片,在施加 500 V 的直流电压并保持 30 min 的条件下,点火芯片未出现发火现象。

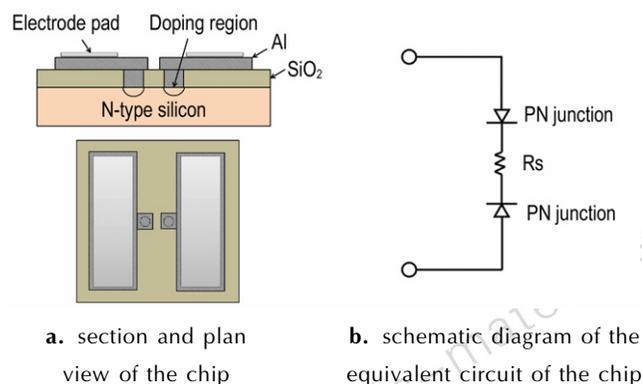


图 14 PN 结型半导体火工品^[32]

Fig. 14 Schematic representation of PN junction igniter^[32]

借鉴上述结构,2016 年,王军^[33]等研究了掺杂浓度对结型半导体桥换能元电爆性能、静电防护性能和射频防护性能的影响规律。GTEM 电磁辐照实验和射频注入实验表明两种掺杂浓度的结型半导体桥换能元在敏感频率和 500 V/m 的场强条件下均能保证安全;静电实验表明低掺杂浓度结型半导体换能元能承受 25 kV (10000 pF 电容串联 $5000\ \Omega$ 电阻放电)静电放

电的冲击。

除上述 PN 结结构外,Martinez-Tovar 等^[34]设计了一种利用介电层来保护半导体桥的点火芯片。结构如图 15 所示,从下到上分别为硅衬底层、氧化硅层、多晶硅层、介电层和金属电极层;由于在金属电极层和多晶硅层中间增加了介电层,当外界电压低于介电层的击穿电压时,介电层呈高阻特性,电流无法流过桥区;只有外界能量高于介电层的击穿电压时,介电层才会被击穿,左右两个电极之间才会形成回路。通过控制介电层的厚度和介电常数等参数,可以设计出具有一定击穿电压值的介电层,有效的屏蔽低于击穿电压信号产生的干扰。同时,为满足防止静电能量对芯片造成破坏,介电层的击穿电压需要设计的很高,那么就需要更高的发火能量才能引起桥的爆发,这对实际使用造成了一定限制。

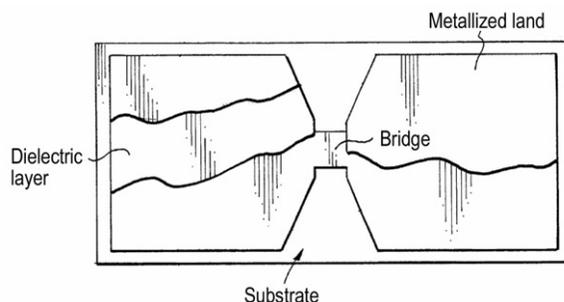


图 15 介电层防护型火工品^[34]

Fig. 15 Voltage-protected semiconductor bridge with dielectric layer^[34]

上述几种设计方法在一定程度上拓展了电火工品的抗电磁环境设计思路,但是关于其进一步的研究及应用还鲜有报道。而国内对于上述提到的新型钝感型电火工品设计还尚未见到公开报道,还需经过实际研究来探索其应用的可行性。

3 总结及展望

随着科学技术的进步,国外在电火工品的抗电磁兼容性设计上已经取得了较多成果,不管是分立器件型防护设计还是集成器件型防护设计,都已经设计并制备出了一系列电火工品,且部分已经过试验验证,证明了防护方法的有效性。而国内对于火工装置的电磁兼容性设计研究只有南理工、兵器 213 所和军械工程学院有相关报道,且研究内容集中在电火工品的分立器件防护型设计、电磁环境下的测试方法和损伤及耦合机理的研究,关于集成型防护设计的电火工品研究

开展还较少。对比国内外在电火工品电磁兼容设计方面的研究,可以得出以下结论:

(1)随着舰载武器的发展,受弹上电源、电爆装置可用空间和成本等因素的限制,钝感电火工品(如爆炸箔等)还不能完全替代传统的敏感型低发火能量电火工品(如桥丝式火工品);因此,如何提高敏感型电火工品的抗电磁干扰能力或研究具有低发火能量、高安全性和可靠性的电火工品是解决电火工品电磁兼容性问题的重要途径。

(2)将电路仿真软件(如 PSpice)引入电火工品的电磁兼容性设计是提高研发效率的有效办法,基于仿真软件强大的器件模型库和计算能力,通过建立电火工品的模型可以快速仿真不同防护器件和防护器件参数变化对防护效果产生的影响及规律。

(3)随着对电火工品尺寸、安全性和可靠性等要求的提出,集成器件型防护设计将是电火工品电磁兼容性设计的一个重要发展方向。利用微纳加工工艺将分立的防护器件(如 TVS 二极管)集成到以硅基为材料的电火工品换能元(如半导体桥火工品)上是实现抗电磁电火工品小型化、集成化、多功能化和低成本化的有效办法。未来应进一步研究换能元和防护器件之间加工工艺的兼容性、版图的设计和理论基础研究等方面。

(4)对于新型钝感型电火工品的设计,其点火机理与传统电火工品存在一定差异,要求设计者重视跨学科知识的融会贯通,积极探索新材料、新工艺在电火工品电磁兼容性设计上的应用。

参考文献:

- [1] 李贵兰,李国新,汪佩兰. 电磁干扰下的电爆装置射频敏感频率研究[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(6): 647-650.
LI Gui-lan, LI Guo-xin, WANG Pei-lan. Study of the RF sensitivity of electro-explosive devices in EMI[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(6): 647-650.
- [2] Guilan L, Feng Z, Weiyu M. Study on radio-frequency damage effects of electro-explosive device [C] // Proceedings of the 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), Gothenburg, Sweden, 2014.
- [3] 任炜,白颖伟,褚恩义,等. 铁氧体材料在火工品电磁波环境适应性设计中的应用[J]. 兵工学报, 2014, 35(9): 1375-1380.
REN Wei, BAI Ying-wei, CHU En-yi, et al. Application of ferrite material in hot-wire EED for improving its adaptability to electromagnetic environment [J]. *Acta Armamentaria*, 2014, 35(9): 1375-1380.
- [4] 白瑞祥,严楠. 静电放电对电火工品桥丝影响的实验研究[J]. 火工品, 2012(3): 9-12.
BAI Rui-xiang, YAN Nan. Experimental study on the effect of ESD on EED bridgewire [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2012(3): 9-12.
- [5] 陈飞. SCB 火工品静电、射频损伤机理及其加固技术的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
CHEN Fei. Research on the damage mechanism and reinforcement technology of electrostatic and RF on SCB explosive devices [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [6] MIL-STD-461G. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment [S]. 2015.
- [7] Pantoja J J, Pena N, Mora N, et al. On the electromagnetic susceptibility of hot wire-based electro-explosive devices to RF sources [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(4): 754-763.
- [8] Maurice A, Morse A O. Shielded initiator: USP 2821139 [P], 1958.
- [9] 叶林. 半导体桥火工品静电射频加固技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
YE Ling. Research on the reinforcement technology of electrostatic and RF on SCB explosive devices [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [10] Novotny D B, Welch B M, Ewick D W. Semiconductor bridge development for enhanced ESD and RF immunity [R]. AIAA99-2417; 1999.
- [11] King T L, Tarbell W W. Pin-to-pin electrostatic discharge protection for semiconductor bridges [R]. SAND2002-2213; 2002.
- [12] 任钢. 半导体桥火工品电磁兼容技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
RENG Gang. Research on the electromagnetic compatibility of semiconductor bridge [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [13] Shores M W. Filter/shield for electro-explosive devices: USP 4592280 [P], 1986.
- [14] Henderson J H, Baginski T A. An RF-insensitive hybrid electro-explosive device incorporating an integral filter [J]. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1996, 32(2): 465-470.
- [15] CHEN F, ZHOU B, QIN Z C, et al. EMC protection of SCB explosive devices by using SMD-based NTC thermistors [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2012, 54(6): 1216-1221.
- [16] 李勇, 李凯, 刘恩良, 等. 负温度系数热敏电阻对半导体桥电爆性能影响 [J]. 含能材料, 2014, 22(6): 808-812.
LI Yong, LI Kai, LIU En-liang, et al. Influence of NTC thermistors on electro-explosive performances of SCB [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(6): 808-812.
- [17] Weinlein J, Sanchez D, Salas J. Electrostatic discharge (ESD) protection for a laser diode ignited actuator [R]. SAND2003-2100; 2003.
- [18] Fisher R J. A severe human ESD model for safety and high reliability system qualification testing [C] // Electrical Overstress and Electrostatic Discharge Symposium Proceedings, 1989.
- [19] 左成林, 周彬, 杜伟强. TVS 二极管用于半导体桥静电安全性研究 [J]. 爆破器材, 2016, 45(3): 62-64.
ZUO Cheng-ling, ZHOU Bin, DU Wei-qiang. Electrostatic safety of semiconductor bridge with external diodes [J]. *Explosive Materials*, 2016, 45(3): 62-64.
- [20] 褚恩义, 白颖伟, 任炜, 等. 电热火工品脉冲电磁波环境适应性设计方法研究 [J]. 火工品, 2013(4): 15-17.

- CHU En-yi, BAI Ying-wei, REN Wei, et al. Research on environmental adaptability design method of hot-wire EED under pulse electromagnetic wave [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2013(4): 15-17.
- [21] 褚恩义, 白颖伟, 王可喧, 等. 电热火工品复杂电磁波环境适应性设计方法研究[J]. *火工品*, 2016(3): 9-12.
- CHU En-yi, BAI Ying-wei, WANG Ke-xuan, et al. Study on the complex electromagnetic compatibility designing method for hot bridge-wire EEDs [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2016(3): 9-12.
- [22] 杜培康. 压敏电阻用于 SCB 火工品电磁防护研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- DU Pei-kang. Electromagnetic compatibility research of varistor used for SCB initiating explosive devices[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [23] 杜培康, 谭明, 李勇, 等. 压敏电阻对半导体桥火工品电爆性能的影响[J]. *含能材料*, 2015, 23(8): 781-786.
- DU Pei-kang, TAN Ming, LI Yong, et al. Electro-explosive performances of SCB igniter with varistor[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(8): 781-786.
- [24] Baginski T A, Baginski M E. A novel RF-insensitive EED utilizing an integrated metal-oxide-semiconductor structure[J]. *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, 1990, 32(2): 106-112.
- [25] Hartman J K, Mccampbell C B. Zener diode for protection of integrated circuit explosive bridge: USP 5309841 [P], 1958.
- [26] Baginski T A, Taliaferro S L, Fahey W D. Novel electroexplosive device incorporating a reactive laminated metallic bridge [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(1): 184-189.
- [27] Martinez-Tovar B. Tubular igniter bridge: USP 7328657 [P], 2008.
- [28] Maeda S, Mukunoki H. Semiconductor bridge device and igniter including semiconductor bridge circuit device: USP 7748323 [P], 2010.
- [29] 韩大勇. 单片集成不发火电路的半导体桥的设计研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- HAN Da-yong. Design of semiconductor bridge ignition with monolithic integration circuit [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [30] Baginski T A. Radio frequency and electrostatic discharge insensitive electro-explosive devices having non-linear resistances: USP 5847309 [P], 1998.
- [31] Baginski T A, Hodel A S. The semiconductor junction igniter: a novel RF and ESD insensitive electro-explosive device [J]. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1993, 29(2): 412-418.
- [32] Baginski T A, Thomas K. A RF-insensitive electro-explosive device with 500V standoff capability [J]. *IEEE EMC Transactions Newsletters*, 2008, 77-80.
- [33] WANG J, ZHOU B, QIAO Z G, et al. Electromagnetic susceptibility of semiconductor junction igniter with different doping density [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, 59(1): 199-206.
- [34] Martinez-Tovar B, Foster M C, Novotney D B. Voltage-protected semiconductor bridge igniter elements: USP 6199484 [P], 2001.

Research Progress and Prospect of Electromagnetic Compatibility of Electro-explosive Device

WANG Jun¹, LI Yong², ZHOU Bin¹, CHEN Hou-he¹, DU Wei-qiang¹, FAN Xiao-wei¹

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: As an ignition and detonated source of weapon system, initiator was an important factor affecting the safety and reliability of weapon systems. From the perspective of insensitive energy conversion component design and selection of protection devices, the latest research development of electromagnetic compatibility design of initiator over the past few years was reviewed. Two methods for improving the immunity of EEDs to electromagnetic environment: adding the protection device to absorb or bypass the energy which coupled from the electromagnetic environment and designing low-firing energy insensitive initiator, were introduced. It was noted that modern microelectronics technology was an effective way to design and prepare the initiator which had advantages of electromagnetic compatibility, large scale preparation, high consistency and high reliability.

Key words: initiator; complex electromagnetic compatibility; radio frequency reinforcement; static electricity reinforcement

CLC number: TJ45

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.11.011