

文章编号: 1003-1480 (2025) 01-0007-06

基于半导体桥芯片的钝感高瞬发底火设计

牛惠媛¹, 任炜¹, 褚恩义¹, 李慧^{1,2}, 常英珂¹, 金豪杰¹

(1. 陕西应用物理化学研究所 瞬态化学效应与控制全国重点实验室, 陕西 西安, 710061; 2. 杭州电子科技大学 微电子研究院, 浙江 杭州, 310018)

摘要: 针对超高速射武器弹药对高频高安全及高一致性点火的发展需求, 基于半导体桥芯片点火技术, 设计了一种新型钝感高瞬发底火。通过对比研究4种半导体桥芯片及其2种封装结构, 选用斯蒂芬酸铅和亚铁氢化铅/高氯酸钾作为两级复合装药, 优化形成了模块化结构的半导体桥底火样机。该底火满足了与弹药接口的匹配要求, 并达到1 A 1 W 5 min 不发火的安全性要求。发火性能试验表明, 所研制的半导体桥底火作用时间不大于200 μ s, 散布不大于30 μ s, 与传统桥丝电底火相比瞬发度和作用时间一致性显著提高, 综合性能更好。

关键词: 底火; 半导体桥; 模块化设计; 高瞬发; 高安全

中图分类号: TJ45+1.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.01.002

Design on An Insensitive High-instantaneous Primer Based on Semiconductor Bridge Chip

NIU Hui-yuan¹, REN Wei¹, CHU En-yi¹, LI Hui^{1,2}, CHANG Ying-ke¹, JIN Hao-jie¹

(1. State Key Laboratory of Transient Chemical Effects and Control, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061; 2. Micro-Electronics Research Institute, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, 310018)

Abstract: Aiming at the development demands of high-frequency, high-safety and high-consistency ignition for ultra-high-speed weapons ammunition, a new type of insensitive high-transient primer was designed based on semiconductor bridge chip ignition technology. By comparing 4 kinds of semiconductor bridge chip and 2 kinds of packaging structure, and selecting two-stage composite charge composed of lead Stephen acid and lead azide/potassium perchlorate, the semiconductor bridge primer prototype with modular structure was optimized. The primer meets the safety requirements of non-ignition under 1 A 1 W 5 min condition and the match requirement with the ammunition interface. The firing property test results show that the action time of semiconductor bridge primer is not longer than 200 μ s and the dispersion is not greater than 30 μ s, compared with the traditional bridge wire electric primer, the instantaneousness and consistency of action time are significantly improved, and the comprehensive performance is better.

Key words: Primer; Semiconductor bridge chip; Modular design; High instantaneous; High safety

在现代及未来战争中, 精确制导武器被大量使用, 它们的存在使得快速发现、即时反应和有效拦截成为战场胜利的关键^[1-2]。超高速射武器弹药系统作为战场末端防御系统的重要组成部分, 以其密集的火力网, 成功构筑起拦截战术飞机、导弹等快速移动目标的防线^[3-5]。海军的小口径反导速射弹药^[6-7]是一类典型的末端防

御导弹系统, 其主要装备于航母、驱逐舰等大型水面舰船, 如美国装备的6管20 mm“密集阵”转管炮, 射频为4 500发/min。国内相继研发6管30 mm舰炮、7管30 mm舰炮和11管30 mm舰炮, 最高射频可达9 800发/min, 要求其弹药系统具备反应时间短、射击频率高等特点^[8-9]; 此外, 近年来为达到更高的弹药

收稿日期: 2023-12-08

作者简介: 牛惠媛 (1999-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事高新火工品技术研究。

通讯作者: 任炜 (1982-), 男, 研究员, 主要从事先进火工品及器件技术研究。

基金项目: 国家自然科学基金 (U2341249)。

引用本文: 牛惠媛, 任炜, 褚恩义, 等. 基于半导体桥芯片的钝感高瞬发底火设计[J]. 火工品, 2025(1): 07-12.

射击频率，国内外还重点关注并发展了“金属风暴”武器系统^[10]，如澳大利亚某公司提出的金属风暴武器多根身管射击频率高达 1×10^6 发/min^[11]。

为满足速射武器弹药“打得更快”、“打得更准”的发展趋势^[12]，对弹药点火系统提出高瞬发技术要求，部分高射速弹药点火在满足高瞬发（不大于 $200 \mu\text{s}$ ）的前提下，还应具备良好的点火同步性，以保证极高速发射条件下多系统匹配的可靠点火。此外，随着战场环境的日趋复杂，需要发展高安全、钝感化的火工品技术^[13]。目前，国外已将瞬发度高、安全性好的半导体桥火工品技术用于超高速射武器弹药^[14]，采用 EBA & D 的半导体桥点火序列，发火水平为 5 A 时，半导体桥作用时间为 $300 \mu\text{s}$ ^[15]。与之相比，国内仍采用传统桥丝电底火，尽管能够满足点火作用时间要求，但受桥丝阻值偏差影响，点燃发射装药的时间散布大，存在点火时间一致性不高的问题，进而导致弹丸膛内运动时间散差较大^[16]，一定程度上会影响弹药系统效能的发挥。

针对传统桥丝式底火点火瞬发度有限、作用时间一致性不高等问题，本研究提出一种基于半导体桥芯片点火的底火设计思路。基于半导体桥火工品的高瞬发度、高安全性的作用特点，以及发火芯片微电子工艺制造的高精度优势，通过优选半导体桥发火芯片、改进底火发火组件及装药结构设计，以及进行全面的性能测试，研制出钝感高瞬发半导体桥底火样机，以适应超高速射武器弹药系统提出的高瞬发、高安全和高一致性的点火技术需求。

1 半导体桥底火总体结构

目前用于速射武器弹药的电底火工作原理及模块组成如图 1 所示。

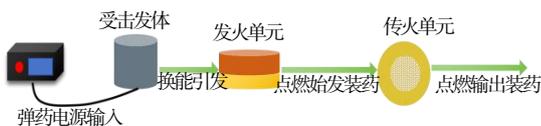


图 1 电底火工作原理及模块组成

Fig.1 Working principle and module composition of electric primer

如图 1 所示，电底火装置主要由受击发体、发火

单元和传火单元组成。受击发体的功能是接收并转换弹药电源提供的电能，进而触发发火单元和传火单元的连续作用。发火单元由换能元和始发装药组成，负责产生初始的点火反应。传火单元则负责将点火能量传递至输出装药，以完成点火过程^[17]。

1.1 总体结构设计

本研究设计的高瞬发半导体桥底火由壳体、半导体桥发火单元（含发火芯片与始发装药）、芯电极以及传火单元（即输出装药）4 个主要模块组成，具体结构如图 2 所示。本设计与现有成熟产品外形及接口相同，同时，采用半导体桥发火芯片替代传统的桥丝，并优化了换能元件的封装结构。

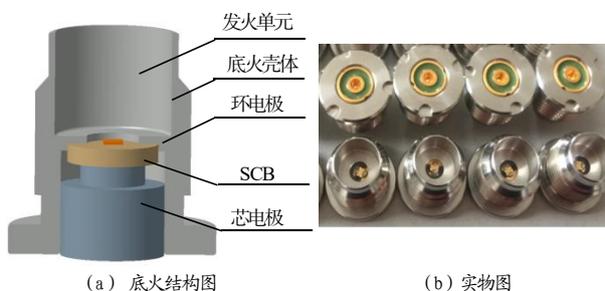


图 2 高瞬发半导体桥底火结构及实物图

Fig.2 High instantaneous semiconductor bridge primer structure and physical map

在进行总体结构设计时，注重了半导体桥发火单元与底火结构的装配适配性，并实现了底火内部结构的模块化设计。具体改进措施包括：

(1) 对底火壳体与半导体桥发火单元及装药接触部分进行了凸台设计，确保底火壳电极与半导体桥发火单元之间能够通过装配形成电气连通，从而实现两者间的稳定接触，并为始发装药预留了相应的装药空间。

(2) 将芯电极与绝缘套进行一体化设计，实现了内部绝缘，简化了装配工艺。此外，通过增大芯电极的上表面，确保了芯电极与半导体桥发火单元下电极之间的良好接触。

1.2 封装结构设计

针对炮射弹药的电气接口特性，本研究对半导体桥芯片的封装设计进行了改进。传统的电极塞封装形式不再适用，因此，结合电底火的特定结构需求，开发了半导体桥发火组件的平面封装技术，即通过采用微电子封装技术将半导体桥芯片封装在印制电路板

(Printed Circuit Board, PCB) 或陶瓷基板上。该种封装组件由上电极和下电极组成, 它们分别与半导体桥芯片两端电路相连, 并与底火结构中的环电极和芯电极相匹配, 如图 3 所示。

本研究设计并制作了两种不同平面封装的半导体桥发火件, 如图 4 所示。封装件的外观尺寸为 $7.0\text{ mm} (d) \times 1.2\text{ mm} (h)$, 与传统制式产品保持一致, 确保了与现有系统的兼容性。

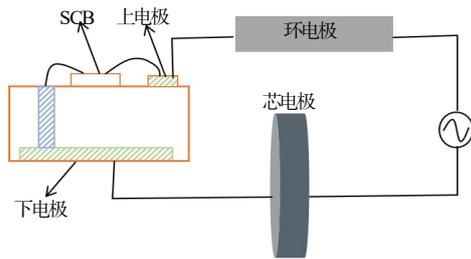


图 3 电路连通示意图

Fig.3 Circuit connectivity schematic

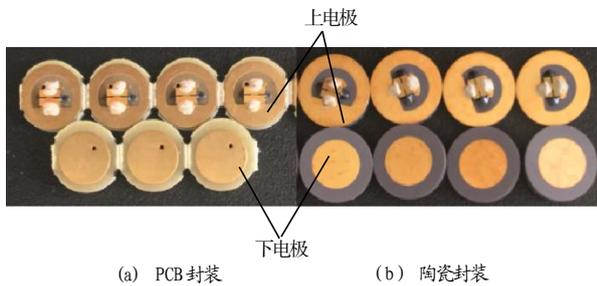


图 4 封装样品

Fig.4 Packaging samples

1.3 发火芯片设计

与传统电热桥丝火工品相比, 半导体桥火工品在安全性、瞬发度和性能一致性方面具有显著优势, 其中, 发火芯片是确保这些优势的关键。为了满足速射弹药高瞬发度、高安全性和高一一致性的要求, 本研究提出了一种基于半导体桥技术的芯片点火方案^[18-19]。

在发火芯片的设计上, 主要采取了以下两个方法:

- (1) 针对要满足 $1\text{ A } 1\text{ W } 5\text{ min}$ 不发火的钝感化要求, 将半导体桥芯片的电阻设计为 $1\ \Omega$, 以实现所需的安全性能;
- (2) 为深入研究芯片桥区结构尺寸参数对点火性能的影响, 在标准钝感桥区结构的基础上, 设计了 4 种不同形状和尺寸的半导体桥芯片, 分别命名为 D-1、D-2、D-3 和 D-4, 其详细参数如表 1 所示。

表 1 半导体桥芯片结构尺寸

Tab.1 Semiconductor bridge chip structure size		
类型	桥区结构	桥区尺寸/ μm
D-1		$320 \times 80 \times 2$
D-2		$380 \times 100 \times 2$
D-3		$440 \times 110 \times 2$
D-4		$500 \times 120 \times 2$

2 半导体桥底火参数优化

2.1 封装形式及芯片类型的选择

在本研究中, 首先选取 D-2 型半导体桥, 对比分析了 PCB 封装及陶瓷封装形式在不同直流条件下的桥区温度, 为参数的优化提供数据支持。桥区温度的测试结果如图 5 所示。由图 5 可见, 在所有测试的直流条件下, 陶瓷封装的桥区温度始终低于 PCB 封装。进一步的试验还发现, 在 1 A 直流输入下, PCB 封装的样品出现了面板发黑和桥区烧蚀的现象, 而陶瓷封装的样品则未出现烧蚀, 如图 6 所示。基于这些试验结果, 并且为了确保 $1\text{ A } 1\text{ W } 5\text{ min}$ 不发火的安全性能, 优选平面陶瓷封装结构作为半导体桥芯片的封装方式。

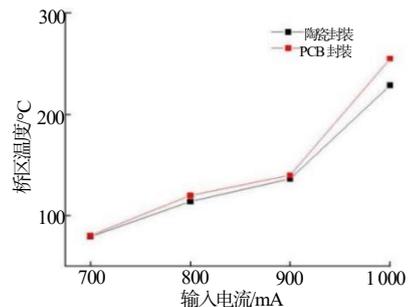


图 5 不同输入电流两种封装形式的桥区温度变化

Fig.5 Temperature change in bridge area of two package forms under different input currents

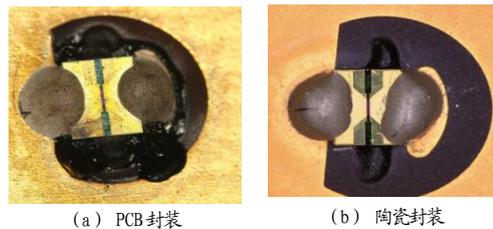


图 6 两种封装形式 $1\text{ A } 1\text{ W } 5\text{ min}$ 试验后情况

Fig.6 Two packaging forms after $1\text{ A } 1\text{ W } 5\text{ min}$ test

针对4种不同设计尺寸的半导体桥芯片,以斯蒂芬酸铅(LTNR)作为始发装药,探讨了芯片桥区尺寸对半导体桥的安全性能和发火性能的影响。依据GJB 5309.11-2004火工品试验方法,进行安全性能测试;并在底火常用的6A直流条件下进行了发火作用时间测试,测试结果见表2。

表2 4种半导体桥芯片测试结果

Tab.2 Test results of four semiconductor bridge chips

类型	序号	电阻/ Ω	不发火电流/A	作用时间/ μs
D-1 (320 μm ×80 μm)	1	1.10	0.9	93
	2	1.08	0.9	101
	3	1.10	0.9	92
	4	1.10	0.9	98
	5	1.10	0.9	103
D-2 (380 μm ×100 μm)	1	0.99	1.0	110
	2	1.02	1.0	107
	3	1.07	1.0	111
	4	1.09	1.0	111
	5	1.12	1.0	108
D-3 (440 μm ×110 μm)	1	0.95	1.0	202
	2	0.96	1.0	204
	3	0.95	1.0	198
	4	0.95	1.0	198
	5	0.95	1.0	196
D-4 (500 μm ×120 μm)	1	0.80	1.0	207
	2	0.83	1.0	254
	3	0.83	1.0	216
	4	0.82	1.1	204
	5	0.82	1.1	262

表2测试结果表明:除D-1芯片外,其余3种芯片均能满足1A1W5min不发火的安全性要求。在电阻值相近时可观察到,在6A直流激励下,桥区尺寸与作用时间呈现出正相关关系,即D-4芯片的作用时间最长,其次是D-3芯片、D-2芯片,D-1芯片的作用时间最短。D-2芯片在满足安全性要求的同时,作用瞬发度更高,因此,优选D-2芯片半导体桥作为发火芯片。

2.2 两级装药结构的优化

在半导体桥发火芯片参数确定之后,装药序列成为决定底火瞬发性能和安全性能的另一项关键技术^[20]。为同时满足高瞬发度点火和高安全可靠的使用要求,本研究设计了两级复合装药结构,该结构由始发装药和输出装药组成。为了减少点火作用时间,选择对热敏感且具有优良瞬发性的点火药剂作为与半导体桥芯片直接接触的始发装药。在性能对比研究中,对LTNR和通过超声波法制备的亚稳态分子间复合含能材料(MIC)进行了深入研究,MIC含能材料由纳米Al/CuO组成,其平均粒度不大于200nm。

装配两种不同始发装药的半导体桥发火单元的安全性能和发火性能测试结果如表3~4所示。

表3 安全性能测试结果

Tab.3 Safety property test results

样品	测试条件	电阻/ Ω	
		测试前	测试后
纳米Al/CuO	1A 5 min	1.07	1.03
	1.2A 5 min	1.18	0.92
LTNR	1A 5 min	1.11	1.09

表3测试结果显示,两种样品均通过了1A1W5min不发火的安全性试验。采用纳米Al/CuO作为点火药的样品呈现了更高的不发火电流阈值,可达1.2A。这一现象可归因于纳米Al/CuO相较于斯蒂芬酸铅(LTNR)具有更优越的耐热性,在升温速率为10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的条件下,LTNR的分解温度为284 $^{\circ}\text{C}$,而Al/CuO的分解温度高达534 $^{\circ}\text{C}$ 。

表4 发火性能测试结果

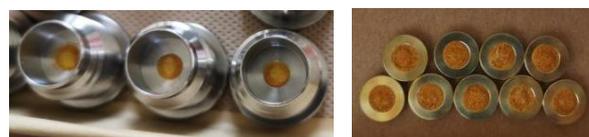
Tab.4 Firing property test results

样品	测试条件	发火情况	平均作用时间/ μs
纳米Al/CuO	6A	部分发火	510
LTNR		发火	103

注:作用时间为发火单元作用时间。

表4结果表明,在6A直流条件下,使用纳米Al/CuO点火药的样品出现部分不发火情况(5发样品中2发未发火)。此外,发火样品的平均作用时间大于400 μs ,未能满足200 μs 的高瞬发度要求。因此,选用LTNR作为始发装药,并采用压装方式与半导体桥芯片组成发火单元,如图7(a)所示。

在确定输出装药时,需考虑其与始发装药及后端发射装药的性能匹配性及点火输出能力。选择低氢化钛/高氯酸钾(THKP)、铝粉/高氯酸钾、硫氰酸铅/氯酸钾、镁粉/二氧化碲、亚铁氢化铝/高氯酸钾(WJ614)5种药剂,并将它们分别与LTNR匹配进行性能对比测试。每种装药序列均进行了5次试验,共计25次。试验结果为所有装药序列均能成功发火,作用时间测试结果如表5所示。由表5可见,WJ614的点火速度最快,平均作用时间为122.4 μs ,因此被确定为最终的输出装药,形成传火单元如图7(b)所示。



(a) LTNR 发火单元

(b) 传火单元

图7 发火单元与传火单元样品

Fig.7 Samples of firing element and ignition element

表5 不同输出装药序列作用时间对比

Tab.5 Comparison of action time of different output charge sequences

装药序列	作用时间/ μs					平均作用时间/ μs
LTNR+THKP	242	236	251	245	228	240.4
LTNR+Al/KClO ₄	294	317	288	296	310	301.0
LTNR+Pb(SCN) ₂ /KClO ₃	197	254	238	208	233	226.0
LTNR+Mg/TeO ₂	283	258	274	286	295	279.2
LTNR+WJ614	122	125	114	119	132	122.4

3 半导体桥底火性能测试

3.1 直流条件下的发火匹配性计算与测试

直流条件下的发火匹配性对于本研究的底火设计至关重要。本研究采用了电火工品大样本步进法试验数据处理方法，即输入能量感度一般服从logistic分布。在此分布模型下，设定发火刺激量 I_1 对应的发火可靠度为 R_f ，安全刺激量 I_0 对应的安全可靠度为 R_s 。根据发火可靠性及安全可靠性的定义，确定了设计阶段的初始感度^[21]。

针对半导体桥底火直流发火匹配性和安全性要求，本研究选定发火刺激量 $I_1=6\text{ A}$ ，安全刺激量 $I_0=1\text{ A}$ ，并在可靠性设计中选取0.999的高可靠度。在这一条件下，计算得到的最大发火率 P 为0.99974，同时选取变差系数 $k=0.05$ 。全发火能量的计算见式(1)：

$$I_{\max}=I_{50}+\frac{\sqrt{3}}{\pi}\ln\left(\frac{P}{1-P}\right)kI_{50}=I_{50}\left[1+\frac{\sqrt{3}}{\pi}k\ln\left(\frac{P}{1-P}\right)\right]$$

$$=4.29\text{ A} \quad (1)$$

以 $I_{\max}=4.29\text{ A}$ 为依据，在3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10A 直流输入条件下，测试研究高瞬发半导体桥底火的直流匹配规律。每种条件下各测试5发样品，平均作用时间结果如图8所示。

试验结果为：不同的直流输入条件下，3A时5发样品中有3发未发火，4A时5发样品中有2发未发火，5A时样品全部发火。在6A直流输入时，作用时间不仅满足200 μs 的高瞬发度要求，而且与常用底火的直流输入条件匹配。此外，随着输入直流电流的增加，底火的作用时间也相应缩短。

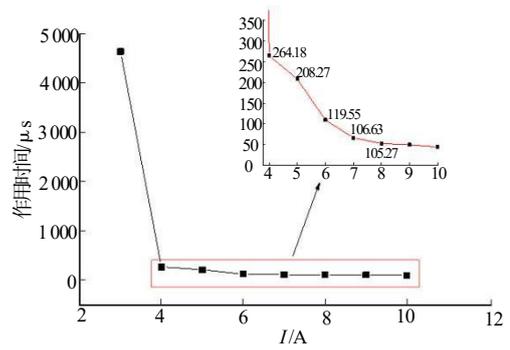


图8 不同直流输入条件下半导体桥底火作用时间

Fig.8 Action time of semiconductor bridge primer under different DC input conditions

3.2 作用性能测试

对设计的高瞬发半导体桥底火开展了包括安全性、点火作用时间与一致性、耐膛压强度在内的综合性能测试，以验证设计的高安全性、高瞬发度和高膛压稳定性的可行性，测试结果如表6所示。

表6 安全性及发火性能测试结果

Tab.6 Safety property and firing property test results

序号	R/Ω	安全性能		发火性能	
		试验条件	试验结果	试验条件	作用时间/ μs
1	1.06				133.1
2	0.99				104.6
3	1.06				116.2
4	0.98				127.5
5	1.03	1 A 5 min	未发火	6A/50ms	109.8
6	1.06				110.1
7	1.04				121.3
8	0.98				112.1
9	1.06				109.8
10	1.05				120.5

在安全性能测试中，10发样品均未发火，试验后电阻未发生变化。对通过安全性能测试的10发样品进行了发火及作用时间测试，结果在6A的发火条件下，所有样品均表现出良好的发火性能，平均作用时间为116.5 μs ，最大时间偏差为29.5 μs 。

此外，为了评估底火的耐膛压性能，采用了如图9所示的弹道膛压强度试验装置，对底火进行了膛压强度测试。



图9 膛压强度试验设备

Fig.9 Chamber pressure strength test equipment

测试所用的膛压均不小于 360 MPa, 共测试了 5 发样品, 结果如表 7 所示。表 7 测试结果表明, 所有样品均通过了耐膛压测试, 未出现瞎火、漏烟或裂纹等缺陷。

表 7 膛压测试结果

Tab.7 Chamber pressure test results		
序号	膛压/MPa	测试结果
1	364.1	
2	364.1	
3	365.4	未出现瞎火、漏烟、裂纹
4	362.7	
5	367.9	

4 结论

本文采用半导体桥芯片点火技术, 针对超高速射的要求, 设计了一种高瞬发半导体桥底火。主要完成半导体桥芯片优选、底火结构发火组件改进和底火点火序列模块化设计 3 方面工作, 得出结论如下:

(1) 设计并优选了 4 种钝感半导体桥芯片, 同时对芯片的封装结构进行了改进, 开发出基于陶瓷基体的平面结构半导体桥发火组件。该组件满足了 1 A 1 W 5 min 不发火的安全性要求。

(2) 在优选细结晶斯蒂芬酸铅、亚铁氯化铅/高氯酸钾作为两级装药的基础上, 采用复合装药结构, 并运用模块化设计理念, 对底火结构及其组件进行了设计改进。这不仅确保了半导体桥芯片与底火之间的接口匹配, 还实现了点火序列的有效适配。

(3) 性能测试结果表明, 所研制的高瞬发半导体桥底火在 6 A 直流输入条件下, 作用时间为 116.5 μs , 最大时间偏差为 29.5 μs , 与传统桥丝电底火作用时间 (约 400 μs) 相比, 瞬发度更高、一致性更好; 此外, 通过增加输入电流, 可进一步提高点火的瞬发性能。

参考文献:

- [1] 韩爱国. 国外先进武器装备及关键技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- [2] 刘杨, 胡江. 国外舰炮武器系统现状及发展研究[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(8):3-6.
- [3] 张继传, 王声才. 现代末端防御武器系统探析[J]. 火力与指挥控制, 2013, 33(8):3-6.
- [4] 孙世岩, 王炳, 胡献君. 高频阵列多管炮齐射外弹道特性仿真研究[J]. 舰船科学技术, 2010, 30(9): 103-106.
- [5] 石晨光. 舰炮武器原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [6] 罗乔. 超高射频火炮内弹道性能参数一致性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [7] 于小舟. 每分钟发射 100 万发子弹的枪[J]. 当代军事文摘, 2005,2(12):39-40.
- [8] 王庆华. 澳发明每分钟发射千万发子弹的枪[J]. 中国科教创新导刊, 1998,27(6):17.
- [9] 贾晨阳. 美国“超高速射弹”发展情况分析[J]. 军事文摘, 2016(17):27-29.
- [10] 李书甫, 常卫伟, 殷利. 金属风暴武器技术发展综述[J]. 舰船科学技术, 2012,34(3):3-8.
- [11] 于海龙, 芮筱亭, 王刚, 等. 射序、射击间隔对“金属风暴”武器射击密集度影响[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(1): 91-93.
- [12] 邱志明, 曹渊. 末端反导小口径转管炮技术发展[J]. 兵工学报, 2022, 43(S2):2-6.
- [13] 朱艳丽, 陈恒帅, 赵婉君, 等. 信息化火工品概念初步探讨[J]. 火工品, 2023(6): 49-55.
- [14] F. N. Mandgo, G. C. Mei, J. C. Fister. Semiconductor bridge (SCB) packaging system: US, 5113764[P].1992-05-19.
- [15] 张海洋. 某转管炮药筒破裂故障原因分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2019,40(3):84-89.
- [16] 李便花, 潘会平, 肖友霖, 等. 某型底火作用失效研究[J]. 新技术新工艺, 2016(7):88-90.
- [17] 王凯民. 火工品工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [18] 郑子龙, 张文超, 秦志春, 等. 高钝感半导体桥发火性能研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(5):954-961.
- [19] 张彬, 褚恩义, 任炜, 等. MEMS 火工品换能元的研究进展[J]. 含能材料, 2017,25(05):428-436.
- [20] 姚则武, 方向东. 影响某型桥丝电底火作用时间因素分析[J]. 兵器装备工程学报, 2014(4):22-25.
- [21] 王凯民, 张学舜. 火工品工程设计与试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.