

半导体桥点火具药剂贮存寿命分析及评估

叶丹丹¹, 安刚², 王磊¹, 叶淑琴³, 周彬¹

(1.南京理工大学, 南京 210018; 2.中国国防科技大学, 长沙 410072;

3.西安庆华公司, 西安 710025)

摘要: **目的** 对在贮存过程中的半导体桥火工品进行失效分析和寿命评估。**方法** 通过差示扫描量热法(DSC)对不同加速寿命实验时间的半导体桥点火具药剂进行分析, 探究 LTNR 和亚铁氰化铅的药剂相容性。通过化学动力学, 分析半导体桥点火具药剂在不同加速寿命实验时间的活化能。**结果** LTNR 和亚铁氰化铅均表现出良好的化学相容性, 在短时间内不会产生性能变化。在贮存的初期, 药剂活化能减小, 热分解速率相对较快。随着贮存时间的延长, 药剂的活化能恢复初始状态, 热分解速率降低。药剂在贮存过程中受温度影响, 始终伴随着缓慢分解, 使得药剂的有效成分减少, 导致药剂的发火时间出现延迟现象。**结论** 半导体桥点火具的失效模式为药剂发火时间延迟, 所以采用半导体桥点火具药剂的发火时间作为关键性能参数。采用趋势线分析法评估半导体桥点火具的贮存寿命大约为 16 a。

关键词: 半导体桥; 加速寿命; 火工药剂; 药剂相容性; 化学动力学分析

中图分类号: TJ450

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)02-0014-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.02.003

Analysis and Evaluation of Storage Life of Semiconductor Bridge Ignition Agent

YE Dan-dan¹, AN Gang², WANG Lei¹, YE Shu-qin³, ZHOU Bin¹

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210018, China; 2. China National University of Defense Technology, Changsha 410072, China; 3. Xi'an Qinghua Company, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: The reliability of semiconductor bridge igniter during storage affects whether the pyrotechnics can function safely. It is very important for the failure analysis and life evaluation of the semiconductor bridge igniter during storage. Differential scanning calorimetry (DSC) is used to analyze semiconductor bridge igniter agents with different accelerated life test times, it is found that both LTNR and lead ferrocyanide exhibit good chemical compatibility and will not change performance in a short period time. Through chemical kinetic analysis of the activation energy of the semiconductor bridge igniter agent at different accelerated life test times. The activation energy of the medicament decreases in the initial stage of storage, and the thermal decomposition rate of the medicament is relatively fast. With the extension of the storage time, the activation energy of the medicine will return to the initial state, and the thermal decomposition rate of the medicine will decrease. Affected by temperature during the storage process of the medicine, it is always accompanied by slow decomposition, which reduces the effective components of the medicine and causes a delay in the ignition time of the medicine. Because the failure mode of the semicon-

收稿日期: 2021-11-29; 修订日期: 2021-12-29

Received: 2021-11-29; Revised: 2021-12-29

作者简介: 叶丹丹(1990—), 女, 博士生, 主要研究方向为半导体桥火工品技术。

Biography: YE Dan-dan (1990—), Female, Doctoral candidate, Research focus: semiconductor bridge initiating explosive device technology.

引文格式: 叶丹丹, 安刚, 王磊, 等. 半导体桥点火具药剂贮存寿命分析及评估[J]. 装备环境工程, 2022, 19(2): 014-019.

YE Dan-dan, AN Gang, WANG Lei, et al. Analysis and Evaluation of Storage Life of Semiconductor Bridge Ignition Agent[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(2): 014-019.

ductor bridge igniter is the delay of the ignition time of the medicament, the ignition time of the medicament of the semiconductor bridge igniter is used as the key performance parameter. The trend line analysis method is used to evaluate the storage life of the semiconductor bridge igniter to be about 16 years.

KEY WORDS: semiconductor bridge; accelerated life; pyrotechnic agent; agent compatibility; chemical kinetic analysis

火工品具有一次性使用的特点, 在使用之前都需要经历很长时间的贮存状态, 军用火工品的贮存时间至少为 15 a^[1]。火工品在贮存过程中会受到环境应力影响, 例如环境温度和湿度都有可能造成火工品的性能退化、参数漂移, 甚至失效^[2-6]。火工品受到环境应力影响, 其性能变化包括两个方面: 一方面, 火工品在接收到指定的能量刺激后能够有效可靠发火, 即火工品的作用可靠性^[7]; 另一方面, 火工品在复杂环境下 (如射频、电磁环境) 不意外发火, 即火工品的使用安全性^[8-9]。为了保证火工品在使用过程中的安全性及可靠性, 对于火工品在贮存过程中性能变化规律、影响性能变化的因素以及产生性能变化的机理的探究是十分有必要的。

半导体桥 (SCB) 火工品是利用金属-半导体复合桥膜或半导体桥膜作为发火元件的电火工品, 具有低发火能量、高安全性、高可靠性、高瞬发度并与数字逻辑电路组合等优良特性^[10]。广泛用于数字化智能化武器、弹道修正、卫星姿态控制以及爆破工程和民用安全气囊等领域, 并成为微型点火和传爆序列芯片应用领域研究热点^[11-16]。目前, 国内外在军民领域都广泛使用 SCB 火工品, 为了确保其安全性和可靠性, 对其长期贮存过程中出现的性能变化机理的探究具有重要意义。2008 年, 唐贤伦^[17]通过温度、湿度和热冲击作为加速寿命实验条件, 探索了 SCB 火工品的失效机理, 发现 SCB 火工品键合的铝丝出现点蚀、剥蚀, 可伐引线出现断脚, 这三种模式都直接导致 SCB 火工品在贮存过程中的可靠性能失效。其失效机理与桑迪亚实验室^[18]研究结果一致, 均为铝丝表面缺陷部位的电解腐蚀。2014 年, 文雷鸣^[19]对新一代 SCB 火工品贮存过程中的性能变化以及失效机理进行了研究, 发现其贮存性能有很大的提高, 键合的金丝未出现点蚀、剥蚀, 芯片镀层良好, 仅可伐引线因氯离子侵蚀有少量点蚀, 未出现断脚现象。加速寿命实验后的 SCB 火工品在规定条件下均能可靠发火, 但是药剂 LTNR 发火实验时间显著延长, 探究为 LTNR 在贮存过程中的活化分子数减少, 反应进行难度增大, 从而引起发火延迟。

本文以 SCB 点火具为实验样品, 装药为 LTNR 和亚铁氰化铅的混合药剂, 采用 t 检验法探究了药剂在加速寿命实验前后发火时间的响应规律。发现混合药剂在加速寿命实验后发火时间延迟, 药剂为 2 种或 2 种以上时, 造成药剂在长期贮存过程中失效的机理分 2 种, 药剂的相容性和药剂自身贮存特性, 从这 2 点分析了药剂延迟的失效机理。当药剂仅受温度影响时, 分解速率更符合阿列尼乌斯公式, 采用趋势线分

析法预估 SCB 点火具贮存寿命更接近真实值。

1 实验

1.1 样品准备

将 SCB 芯片用环氧胶粘在陶瓷凹槽中, 通过金丝键合技术, 将脚线与芯片电极相连, 涂敷银浆, 加固金丝的安全可靠性能, 依次在不锈钢外壳中放入绝缘垫片、电极塞。用 120 kg 的压力将药剂压入电极塞凹槽中, 除去浮药放入垫圈和垫片收口。上下两个端面涂敷环氧树脂, 确保其密封性能。SCB 点火具实物如图 1 所示。制作好的 SCB 点火具结构如图 2 所示, 其中陶瓷塞直径为 8 mm, SCB 芯片桥尺寸为 $100\text{ }\mu\text{m}\times 400\text{ }\mu\text{m}\times 2\text{ }\mu\text{m}$, 电阻为 $1\text{ }\Omega$, 双 V 型结构。药剂为 LTNR 和亚铁氰化铅的混合药剂, LTNR 虽然起爆能力比较弱, 但是对半导体等离子感度较高, 适合作为 SCB 芯片的起爆药。亚铁氰化铅作为常用点火药, 起爆能力比 LTNR 强。



图 1 SCB 点火具实物
Fig.1 Physical picture of SCB ignition

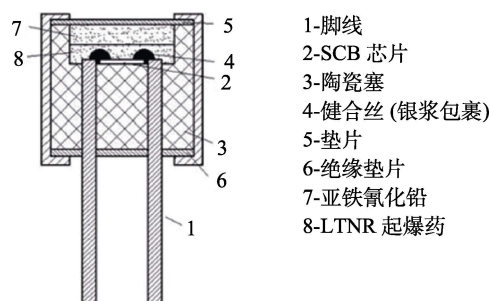


图 2 SCB 点火具结构
Fig.2 SCB ignition device structure diagram

1.2 加速寿命实验

加速应力一般选用火工品在使用环境中最为严酷的温度, 参考火工品双应力恒定温、湿度加速寿命实验方法, 加速实验的恒定温度为 $71\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度

为80%。确定加速寿命实验条件后,将样品各项参数测试记录,在常温、常湿条件下放置24 h,然后放置在相对湿度为80%的干燥器中,调节烘箱恒温71℃,开始计时。取样时间为7、14、21、28、35 d。在规定时间取出样品后,放置常温、常湿条件下24 h,进行各项测试。

2 结果与讨论

2.1 贮存对SCB点火具药剂爆发时间的影响

将不同加速寿命实验时间的SCB点火具在电容为68 μF、发火电压为23 V的条件下,通过电容放电发火系统发火,利用光电传感器将信号传输到示波器中,从示波器中的曲线可获得药剂发火时间。加速寿命实验时间与SCB点火具药剂发火时间的关系如图3所示。可以看出,药剂发火时间随加速寿命实验时间的延长而增大。

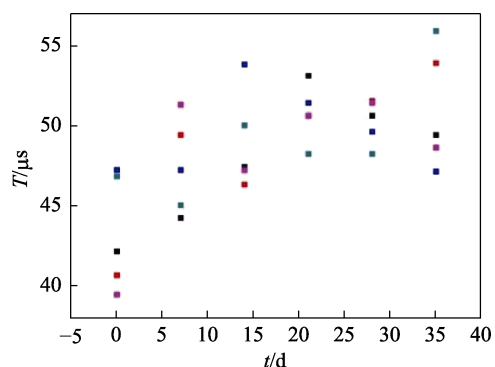


图3 SCB点火具药剂发火时间与加速寿命实验时间关系
Fig.3 The relationship between the ignition time of the SCB igniter and the accelerated life test time

同样通过 t 检验法来判断不同加速寿命实验时间与未加速寿命时间下药剂发火时间的差异性。表1为不同加速寿命实验时间与未经过加速寿命时间的SCB点火具芯片爆发时间 t 检验结果。结果显示,SCB点火具的加速寿命时间达21 d后,药剂发火时间与未加速样品药剂的发火时间有显著差异。SCB点火具药剂发火时间均值随加速寿命实验时间的延长而增大。

表1 SCB点火具药剂发火时间 t 检验表

Tab.1 Test table of the ignition time t of the SCB igniter medicament

试验时间/ d	发火时间 均值/μs	标准差/ μs	样品量	$ t $ 值	是否存在显著 性差异
0	43.3	3.2	5	—	—
7	47.5	2.7	5	2.2	否
14	49.0	3.1	5	2.3	否
21	50.4	2.1	5	3.2	是
28	50.4	1.4	5	4.1	是
35	54.1	5.0	5	9.0	是

2.2 药剂相容性分析

美国Honeywell公司在20世纪70年代提出了药剂的相容性可以通过热分析法作为评价标准^[20]:

$$\Delta t_{\max} = t_{\max 1} - t_{\max 2} \quad (1)$$

式中: $t_{\max 1}$ 为单一药剂的最大放热峰温度; $t_{\max 2}$ 为混合药剂的最达放热峰温度。表2为美国火工药剂差示扫描量热法(DSC)相容性评价标准。

表2 DSC相容性评价标准

Tab.2 DSC compatibility evaluation standard

$\Delta t_{\max}/^{\circ}\text{C}$	等级	评价
≤ 2	A	相容性好, 相容
3~5	B	相容性较好, 轻微敏感
6~15	C	相容性较差, 敏感
15以上	D	相容性差, 不相容

注:A为完全可以使用;B为可以用于短期使用,不能用于长期贮存的体系;C为最好不使用;D为危险,禁止使用

根据LTNR的分解温度为260~300℃,亚铁氰化铅的分解温度为350~400℃,取0.3 mg样品,在40~450℃条件下,以10 K/min升温速率进行DSC测试。LTNR DSC曲线如图4所示,分解温度为292.31℃。LTNR和亚铁氰化铅混合药剂的DSC曲线如图5所示,混合药剂中LTNR的分解温度为291.62℃。由此可得, $\Delta t_{\max}$ 等于0.69。根据表3相容性评价标准判据,LTNR与亚铁氰化铅的化学相容性好,可作为SCB点火具的点火装药,在短期内,性能不会发生变化。

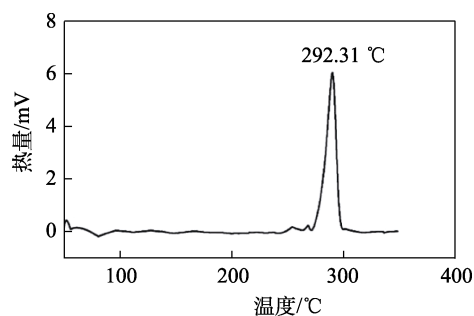


图4 LTNR DSC曲线
Fig.4 LTNR DSC curve

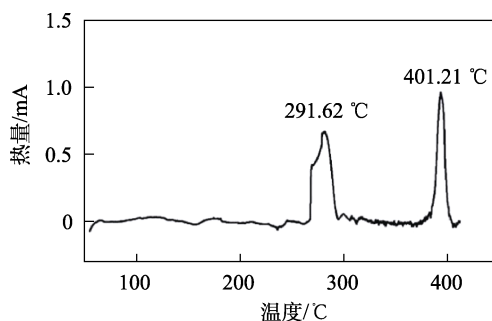


图5 LTNR和亚铁氰化铅混合药剂DSC曲线
Fig.5 DSC curve of LTNR and lead ferrocyanide mixture

2.3 化学动力学分析

SCB 点火具上下端面涂敷环氧树脂,在加速寿命实验后,均未出现裂缝脱落等现象,保证了其密封性能。说明在加速寿命实验中,湿度的影响很小,主要受环境温度影响。温度升高使药剂中活化分子数增多,加快了药剂的分解。可以通过求解不同加速寿命实验时间的药剂活化能,得到药剂在贮存过程中因为温度因素的影响产生的热分解速率变化。

热分析活化能采用 Kissinger 方法^[21],其方程为:

$$\ln \frac{\beta}{T_m^2} = \left(\ln A - \ln \frac{E}{R} \right) - \frac{E}{RT_m} \tag{2}$$

式中: β 为升温速率; T_m 为 DSC 曲线上峰值温

度; E 为活化能; A 为频率因子; R 为气体常数。在不同升温速率的条件下进行 DSC 测试,得到相应的

DSC 曲线峰值温度 T_m ,再以 $\ln \left(\frac{\beta}{T_m^2} \right)$ 相对于 $\frac{1}{T_m}$ 做直线方程,求解直线方程的斜率可求得活化能 E 。

以 5、10、20 K/min 升温速率对不同加速寿命实验的点火具进行 DSC 测试,得到不同加速寿命试验时间、不同升温速率下的 DSC 曲线,读取 LTNR 和亚铁氰化铅的峰值温度 T_m ,结果见表 3 和表 4。

根据式 (2),以 $\ln \left(\frac{\beta}{T_m^2} \right)$ 相对于 $\frac{1}{T_m}$ 做直线方程,

可求取不同加速寿命实验时间的 LTNR 和亚铁氰化铅的活化能,结果见表 5。

表 3 不同升温速率 LTNR DSC 曲线 T_m
Tab.3 Different heating rate LTNR DSC curve T_m

升温速率/(K·min ⁻¹)	K					
	0 d	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d
5	554.54	553.01	553.33	553.63	552.25	554.0
10	564.77	564.48	566.39	564.43	565.0	564.68
20	573.53	573.35	572.44	572.71	574.03	573.46

表 4 不同升温速率亚铁氰化铅 DSC 曲线 T_m
Tab.4 DSC curve T_m of lead ferrocyanide at different heating rates

升温速率/(K·min ⁻¹)	K					
	0 d	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d
5	666.36	665.85	665.85	665.01	664.96	665.87
10	674.36	674.5	674.32	673.91	673.21	674.03
20	685.42	684.87	683.78	684.27	683.88	684.21

表 5 不同加速寿命试验时间药剂活化能
Tab.5 Calculation table of activation energy of medicament for different accelerated life test time

试验时间/ d	LTNR		亚铁氰化铅	
	活化能/ (kJ·mol ⁻¹)	线性 相关度	活化能/ (kJ·mol ⁻¹)	线性 相关度
0	182.48	0.9967	276.44	0.9999
7	169.77	0.9883	276.44	0.9999
14	174.34	0.9048	276.82	0.9982
21	180.22	0.9718	256.53	0.9965
28	174.65	0.9241	270.70	0.9577
35	178.67	0.9904	276.61	0.9810

活化能表示药剂分子从稳定状态转化为活泼状态所需的能量,活化能越低,热分解反应速率越快。由表 5 可知,LTNR 和亚铁氰化铅的活化能由大变小,再恢复到初始状态。说明在贮存初期,热分解速度较快,随着贮存时间的延长,药剂的活化能恢复到初始状态,热分解速率变缓慢。贮存过程中的热分解使得药剂的有效成分减少,导致药剂发火时间延迟。

2.4 趋势线法预估贮存寿命

趋势线分析方法^[22-23]是根据火工品关键性能参数随贮存时间变化的寿命趋势图,计算在一定置信度和可靠度下关键性能参数的容忍区间,通过关键性能参数的指标与计算获得的容忍上限或下限的交点作为贮存时间^[24-25]。

贮存时间与关键性能参数的回归模型如式 (3) 所示。

$$Y=kt+b \tag{3}$$

式中: Y 为关键性能参数; t 为贮存时间; k 为回归系数; b 为截距。

当置信度为 γ ,其可靠度为 R 时,可根据回归模型计算关键性能参数的容忍区间。

容忍上限:

$$Y = kt + b + \frac{1}{n}t(1-\gamma, n-2, \delta)S \tag{4}$$

容忍下限:

$$Y = kt + b - \frac{1}{n}t(1-\gamma, n-2, \delta)S \tag{5}$$

式中: $t(1-\gamma, n-2, \delta)$ 是自由度为 $n-2$ 的非中心 t 分布; δ 为非中心 t 分布的非中心参数; S 为回归模型的标准误差。

根据不同加速寿命实验时间下 SCB 点火具药剂发火时间, 可得到关键性能参数药剂发火时间随贮存时间变化的趋势, 如图 6 所示。图 6 中, 置信度 $\gamma=0.95$, 可靠度 $R=0.95$, 据此计算构造容忍上限和下限, 以 SCB 验收规定药剂发火时间不超过 $60 \mu\text{s}$ 作为关键性能参数指标。由图 6 可知, 在加速寿命实验时间进行到 41.5 d 时, 预计药剂发火时间为 $60 \mu\text{s}$ 。

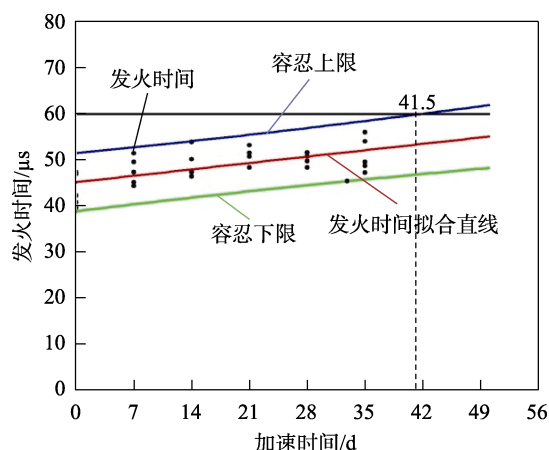


图 6 SCB 点火具药剂发火时间随贮存时间变化的趋势
Fig.6 The trend diagram of the ignition time of the SCB igniter medicament varies with the storage time

根据 SCB 点火具在贮存过程中受温度影响, 符合阿列尼乌斯模型^[26-27]。把温度为 71°C 的加速应力代入根据阿列尼乌斯公式, 得到药剂加速寿命实验加速系数 τ 为:

$$\tau = e^{(T_1 - T_0)/10} \approx 143.5 \quad (6)$$

通过加速系数值 143.5 和加速寿命实验贮存时间 41.5 d, 可预估 SCB 点火具药剂的贮存寿命为 16 a。

3 结论

1) SCB 点火具药剂在加速寿命实验后, 药剂发火时间随加速寿命实验时间的延长而增大, 贮存对药剂产生了影响。

2) 根据美国火工药剂 DSC 相容性评价标准, LTNR 的 $\Delta t_{\max}$ 小于 2, LTNR 和亚铁氰化铅具有较好的相容性, 能够长期贮存。

3) 根据点火药剂的动力学分析, 在贮存前期, 药剂活化能减小, 热分解速率较快, 然后活化能恢复到初始状态, 热分解速率减慢, 但是贮存过程中药剂一直有热分解现象, 所以贮存过程中药剂的有效成分减少, 导致失效模式为药剂发火延迟。

4) SCB 点火具失效模式仅受温度影响时, 与实际贮存条件更接近, 药剂的分解速率更符合阿列尼乌斯公式。用趋势线法预估贮存寿命比较贴近真实值,

保守预估 SCB 点火具贮存寿命约为 16 a。

参考文献:

- [1] 王凯民, 温玉全. 军用工工品设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
WANG Kai-min, WEN Yu-quan. Design of Initiators and Pyrotechnics for Weapon Systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [2] PECK D S, ZIERDT C H. Temperature-Humidity Acceleration of Metal-Electrolysis Failure in Semiconductor Devices[C]//11th Reliability Physics Symposium. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 1973.
- [3] GUNN J E, MALIK S K, MAZUMDAR P M. Highly Accelerated Temperature and Humidity Stress Test Technique (HAST)[J]. Microelectronics Reliability, 1982, 22(6): 1186.
- [4] 孙志安. 装备环境应力归纳技术研究[J]. 指挥控制与仿真, 2011, 33(5): 108-113, 118.
SUN Zhi-an. Study on Environmental Stress Induction Technique for Equipment[J]. Command Control & Simulation, 2011, 33(5): 108-113, 118.
- [5] 焦志刚, 岳明凯. 弹药可靠性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
JIAO Zhi-gang, YUE Ming-kai. Ammunition Reliability Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [6] 张福光, 崔旭涛, 洪亮. 导弹火工品贮存寿命的影响因素分析[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 24-27.
ZHANG Fu-guang, CUI Xu-tao, HONG Liang. Influencing Factor Analysis of Storage Life of Missile Initiating Explosive Devices[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 24-27.
- [7] 徐振相, 秦士嘉. 火工品可靠性技术: 基础与管理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1996.
XU Zhen-xiang, QIN Shi-jia. Basis and Management of Reliability Technology of Initiating Explosive Products [M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1996.
- [8] 李陵, 但波, 倪保航, 等. 火工品安全性影响因素分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(5): 545-548.
LI Ling, DAN Bo, NI Bao-hang, et al. Analysis on the Safety Influence Factors of Pyrotechnics[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2010, 25(5): 545-548.
- [9] BUTLER J K. The Cardinal Rule of Explosives Safety[J]. Journal of Chemical Health and Safety, 2014, 21(3): 16-21.
- [10] 徐振相, 周彬, 秦志春, 等. 微电子火工品的发展及应用[J]. 爆破器材, 2004, 33(S1): 29-34.
XU Zhen-xiang, ZHOU Bin, QIN Zhi-chun, et al. Development and Application of Microelectronic Explosives[J]. Explosive Materials, 2004, 33(S1): 29-34.
- [11] BICKES R W, SCHLOBOHM S L. Transformer Coupled

- Semiconductor Bridge Igniter for Low Voltage Ignition from a High Voltage Source[R]. SAND90-0001C, 1990.
- [12] 杨庆, 汪佩兰, 金建峰. 常规弹药弹道修正用推冲器的国内外研究概况[J]. 含能材料, 2008, 16(4): 474-479.
YANG Qing, WANG Pei-lan, JIN Jian-feng. Review on Impulse Thruster Used for Trajectory Correction of Conventional Munitions in Domestic and Abroad[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(4): 474-479.
- [13] HEADLEY E. Ignition System for Shaped Charge Perforating Gun: EP0396465[P]. 1994-06-15.
- [14] NERHEIM E, HOFF D. Integrated Silicon Secondary Explosive Detonator: US4862803[P]. 1989-09-05.
- [15] HEADLEY P S, BICKES R W. A Semiconductor Bridge (SCB) Primary Explosive Detonator[R]. SAND86-2045, 1986.
- [16] EWICK D W, WALSH B M. Initiator with Loosely Packed Ignition Charge and Method of Assembly: US6408759[P]. 2002-06-25.
- [17] 唐贤伦. 半导体桥失效机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
TANG Xian-lun. Research on the Failure Mechanism of Semiconductor Bridge[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [18] 赵婉, 韩天龙. 基于活化能的火工品加速贮存寿命试验优化设计方法[J]. 含能材料, 2009, 17(4): 475-477.
ZHAO Wan, HAN Tian-long. Optimum Design Method of the Accelerated Storage Life Test for Pyrotechnics Based on Activation Energy[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(4): 475-477.
- [19] KLASSEN S, SORENSEN N. An Investigation of Corrosion in Semiconductor Bridge Explosive Devices[R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2007.
- [20] BEACH N E, CANFIELD V K. Compatibility of Explosives with Polymers(III)[R]. AD721004, 1971.
- [21] 麻宏亮, 张蕊, 李芳, 等. 趋势分析方法在火工品寿命评估中的应用[J]. 火工品, 2013(3): 53-56.
MA Hong-liang, ZHANG Rui, LI Fang, et al. The Application of Trend-Line Analysis in Life Prediction of Initiating Explosive Device[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013(3): 53-56.
- [22] YANG Li-en, MILLER D, KUENNEN T. Advanced Applications of Statistical Methods in Testing of Energetic Components and Systems[C]//41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Tucson, Arizona. Reston, Virginia: AIAA, 2005: 4039.
- [23] 李立众. 几个具有非中心参数的统计量的分布[J]. 安徽机电学院学报(自然科学版), 1999, 14(3): 54-58.
LI Li-zhong. The Statistics Amount Distribution of Several Non Central Parameteters[J]. Journal of Anhui Institute of Mechanical and Electrical Engineering, 1999, 14(3): 54-58.
- [24] 陈希儒. 高等数理统计[M]. 北京: 科学出版社, 1999
CHEN Xi-ru. Advanced Mathematical Statistics[M]. Beijing: Science Press, 1999
- [25] GRAYBILL F A, IYER H K. Regression Analysis Concept and Application[M]. Duxbury Press: Blemont CA, 1994.
- [26] 王守国. 电子元器件的可靠性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
WANG Shou-guo. The Reliability of Electronic Components[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [27] 许越. 化学反应动力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
XU Yue. Chemical Reaction Kinetics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.