

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.06.007

抗过载长秒量延期电点火具结构与性能研究^{*}

沈林燕^① 王佳茵^② 王保国^① 曾雅成^① 赵文虎^③ 张彦亮^③ 康建成^④

①中北大学环境与安全工程学院(山西太原,030051)

②太原工业学院电子工程系(山西太原,030008)

③山西北方晋东化工有限公司(山西阳泉,045000)

④空军装备部驻太原地区军事代表室(山西太原,030006)

[摘 要] 为提高电点火具的抗过载能力,并满足长延期的要求,在研究提高电点火具抗过载的方法和影响延期药燃烧速度因素的基础上,设计了一种抗过载长秒量延期电点火具。采用复式结构壳体(内外双壳,内壳为铝、外壳为镍铜)来提高其抗过载能力,壳内涂虫胶漆。选用玻璃-金属封结电极塞来提高密封性。点火药为 m (聚四氟乙烯): m (铝粉): m (镁粉)=40:30:30 的高能点火药。延期元件选用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢材料管壳。延期药为钨系延期药,组分质量比为 $m(W):m(KClO_4):m(BaCrO_4):m(\text{黏结剂})=33:10:55:2$ 。使用泡沫铝作为延期元件和壳体间的缓冲材料,厚度为 1.5 mm。运用 ANSYS 软件,仿真验证了电点火具的抗过载能力,满足设计要求。采用堵、泄结合的方式进行防静电设计;在点火药和壳体之间设计环氧树脂绝缘环,厚度为 1.5 mm;在电极塞中部设计 0.2 mm 宽的空气隙,提高使用安全性。通过对电点火具结构、药剂、材料等方面的优化,提升了电点火具的抗过载能力,满足了长秒量延期要求。

[关键词] 电点火具;抗过载;长秒量延期

[分类号] TJ45

Structure Design and Performance Research of an Anti-Overload and Long-Second Delay Electric Igniter

SHEN Linyan^①, WANG Jiayin^②, WANG Baoguo^①, ZENG Yacheng^①, ZHAO Wenhui^③,
ZHANG Yanliang^③, KANG Jiancheng^④

①School of Environmental and Safety Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

②Department of Electronic Engineering, Taiyuan Institute of Technology (Shanxi Taiyuan, 030008)

③Shanxi North Jindong Chemical Co., Ltd. (Shanxi Yangquan, 045000)

④Military Representative Office of Air Force Equipment Department Stationed in Taiyuan Region (Shanxi Taiyuan, 030006)

[ABSTRACT] In order to improve the anti-overload ability of the electric igniter, and to meet the requirements of long delay, an anti-overload and long-second delay electric igniter was designed by studying the anti-overload methods to improve the overload resistance of igniters and the factors affecting the burning rate of delay compositions. Double structure shell (inner and outer double shells) was adopted to improve its anti-overload capacity, and the inner surface of the shell was coated with shellac paint. Glass-metal seal electrode plug was selected to improve the sealing performance. High energy ignition powder with component mass ratio of $m(\text{polytetrafluoroethylene}):m(\text{aluminum powder}):m(\text{magnesium powder})=40:30:30$ was used. The delay element was made of 1Cr18Ni9Ti stainless steel. The component mass ratio of tungsten delay composition was $m(W):m(KClO_4):m(BaCrO_4):m(\text{binder})=33:10:55:2$. Foam aluminum was used as the buffer material between the delay element and the shell, with a thickness of 1.5 mm. Using ANSYS software, the anti-overload capacity of electric igniter was verified to meet the design requirements by simulation. Anti-static design was carried out by combining blocking and discharging. The epoxy resin insulation ring with a thickness of 1.5 mm was used between the ignition powder and the shell, and an air gap with width of 0.2 mm was designed in the middle of the electrode plug to improve the use safety. Through the optimization of structure, agent and material of the electric igniter, the anti-overload performance of the electric igniter has been improved, and it meets the requirements for long-second delay.

[KEYWORDS] electric igniter; anti-overload; long-second delay

^{*} 收稿日期:2022-04-22
第一作者:沈林燕(1997-),女,硕士研究生,主要从事火工品的设计与性能研究。E-mail: 1356608332@qq.com

引言

电点火具多用于火箭弹和火焰喷射器等的点火,有桥丝式、火花式和导电药式等几种类型。弹丸侵彻目标时,在撞击目标的瞬间所承受的冲击过载加速度达 $1 \times 10^5 \text{ g}$ 以上。高过载下,同原理的桥丝电雷管受到塑性波的作用失效时,失效模式主要为结构失稳。由此可知,电点火具失效的主要原因是结构变形。

孙晓霞等^[1]、蔺美君等^[2]通过在点火具、雷管等火工品中添加衬垫来提高抗过载性能,双向过载时可在两端加入衬垫;试验与模拟结果表明,衬垫能有效隔离冲击应力波并缓冲火工品的质量惯性。虞跨海等^[3]对不同类型的泡沫铝进行试验并仿真,发现泡沫铝前置可以有效降低引信在侵彻过程中承受的过载,使用复合夹层结构可以有效降低其被压实的程度。张文平^[4]设计了一种延期元件,增加了消爆空腔,为延期药提供了一个更为稳定的燃烧环境,提高了延期精度。李便花等^[5]将某型电点火具的绝缘套管材料改为聚四氟乙烯,该材料可承受电压 36 kV,可抵抗脚-壳间电压击穿,试验验证改进后,消除了静电隐患。

以上文献从增加衬垫提高过载能力、增加消爆空腔提高延期精度、以及提高预防静电的能力等方面进行了研究,但关于抗过载长秒量结构的电点火具研究较少。本文中,在点火具抗过载的基础上,设计了长秒延期装药,通过结构和防静电设计,保证电点火具可靠作用。

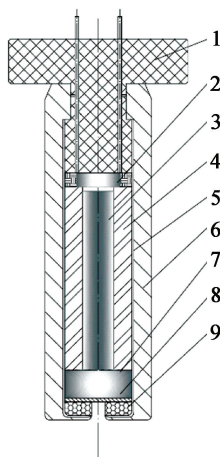
1 设计方法与原理

该电点火具由发火元件、延期体、点火药等组成,结构如图 1 所示。

1.1 发火元件设计

发火元件为桥丝式。电点火具受到轴向加载,电极塞很可能发生内陷。采用高强度、高硬度的钛合金和玻璃封接设计的电极塞^[1,6]。脚线为铜丝,间距 4.8 mm。桥丝使用 6J20 镍铬丝,直径 50 μm ,电阻 2.2 ~ 2.3 Ω ,安全电流 200 mA,全发火电流 400 mA。桥丝上压装点火药,完成点火作用。在远离点火药的中间部位设计空气隙。同时,在桥丝与点火药接触的外部设置绝缘环,厚 1.5 mm。

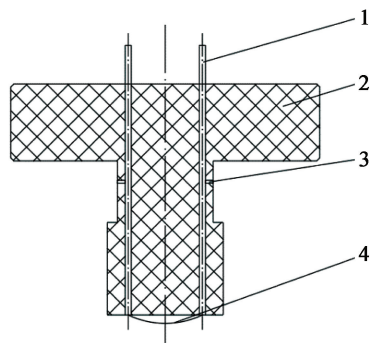
发火元件结构如图 2 所示。



1 - 发火元件;2 - 引燃药;3 - 延期药;4 - 1Cr18Ni9Ti 不锈钢壳;5 - 铝内壳;6 - 镍铜外壳;7 - 点火药;8 - 盖片;9 - 泡沫铝。

图 1 抗过载长秒量延期电点火具的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the anti-overload and long-second delay electric igniter



1 - 脚线;2 - 电极塞;3 - 空气隙;4 - 桥丝。

图 2 发火元件的结构示意图

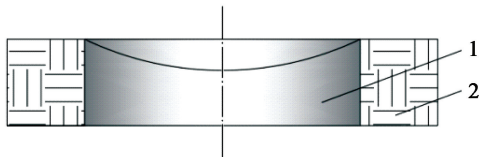
Fig. 2 Structure diagram of the ignition element

1.2 药剂选择与结构设计

1.2.1 引燃药

根据秒量要求,选用慢速延期药。该类延期药一般较难点燃。为保证作用可靠性,引燃药选择高能点火药为宜。根据 MIL-STD-1901A 标准,选择燃烧时间短、燃烧热值较大的硼/硝酸钾^[7-8]作为引燃药。

引燃药部分结构如图 3 所示。



1 - 引燃药;2 - 绝缘环。

图 3 引燃药的结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of the ignition powder

1.2.2 延期元件

延期元件主要由管壳和延期药两部分组成。

管壳的选择从两个方面考虑:一是对延期精度等有无影响;二是是否能承受高过载的冲击。拟使用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢材料作为延期体管壳。

在研究长延期点火具时,延期精度和瞎火是两大主要设计重点和难点。当延期时间为 $10 \sim 10^2$ s 时,一般选用钨系慢速延期药。

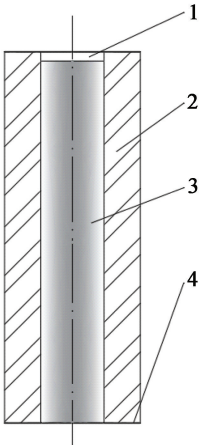
反应方程式

$$3\text{KClO}_4 + 8\text{BaCrO}_4 + 8\text{W} \longrightarrow 3\text{KCl} + 8\text{BaWO}_4 + 4\text{Cr}_2\text{O}_3。 \quad (1)$$

为配合长秒量设计,对延期药组分分配比进行相应的调整,减少钨粉含量,减小燃速^[4]。电点火具受到冲击,会导致延期元件结构失稳,需承担较大的拉伸应力。添加硅藻土和聚硫密封胶黏结剂,降低燃烧温度效应^[8],增强抗过载能力,提高延期精度。延期药的组分质量比为 $m(\text{W}) : m(\text{KClO}_4) : m(\text{BaCrO}_4) : m(\text{黏结剂}) = 33 : 10 : 55 : 2$ 。

为提高延期元件抗过载能力,防止产生漏药和反向点火等不利于可靠点火的现象,增加传火可靠性,在延期元件上、下各放置一个边缘带缺口的纸垫片^[9]。输入端面设计为凹面,可以收容燃烧产生的气体^[10],当遇到超高过载时,能防止针刺面直接受力,提高抗过载能力。

延期元件结构如图 4 所示。



1 - 气室;2 - 1Cr18Ni9Ti 不锈钢壳;3 - 延期药;4 - 纸垫片。

图 4 延期元件的结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of the delay element

1.2.3 点火药

黑火药难以点燃一些钝感的火药或烟火剂,当延期药发火点比较高或者难以点燃时,通常选用高热效应混合药剂,减少点火药用量。

秒级延期药的火焰感度较低,一般需要装火焰

感度高的点火药起引燃作用。聚四氟乙烯拥有良好的缓冲性能^[1],可提高整体抗过载能力,选用 $m(\text{聚四氟乙烯}) : m(\text{铝}) : m(\text{镁}) = 40 : 30 : 30$ 的点火药,并在壳体内壁涂虫胶漆防潮。

1.3 抗过载设计

从整体结构强度和增加缓冲材料两方面考虑。

火工品整体采用收口结构,防止药剂的冲击窜动和蹿火问题。典型桥丝式电火工品的过载加速度约为 $1 \times 10^5 \text{ g}$ ^[6],电点火具整体质量不宜过重,在电点火具内部增设缓冲材料,并尽可能减小系统体积。电点火具壳体采用复式结构(内外双壳),内管为厚 0.2 mm 的铝壳,外壳为 2 mm 厚的镍铜壳,有效提高了抗过载性能。结构失稳是过载的主要影响因素,电点火具轴向受力,因此主要考虑轴向过载引起的结构变形。开孔泡沫铝性能优异,缓冲效果好^[11],故在延期体输出端设计厚 1.5 mm、内径 2.0 mm、外径 7.5 mm 的环状泡沫铝减缓冲击过载,外包一层不锈钢薄板。

1.4 防静电设计

堵式和泄式是经常使用的预防静电的方法。堵式最常用的是在易击穿位置设置绝缘环;泄式则是在结构中设计出一条保护通道,脚-壳间静电能量早于危险通道泄放,从而起到保护作用。一般堵和泄结合使用^[12]。

由于击穿不是瞬时完成的,而空气具有良好的击穿重复性,在发火件中部预留空气隙作为泄放通道。同时,在过渡药和壳体之间采用环氧树脂作为绝缘环,厚度为 1.5 mm。

2 结果与讨论

2.1 计算、试验与仿真结果

2.1.1 发火安全性计算

当发火元件通入直流电流 I 且输入功率很低时,桥丝温度不变,发火元件构成稳态条件^[8],忽略药剂反应放热和桥丝热散失,存在

$$Q_1 = Q_2 + Q_3; \quad (2)$$

$$Q_1 = I^2 R t; \quad (3)$$

$$Q_2 = c_1 m_1 (T_2 - T_1); \quad (4)$$

$$Q_3 = c_2 m_2 (T_2 - T_1)。 \quad (5)$$

式中: Q_1 表示通电所产生的热量,J; Q_2 表示桥丝升温所吸收的热量,J; Q_3 表示药剂升温所吸收的热量,J; I 表示通过桥丝的电流,A; R 表示桥丝电阻, Ω ; c_1 表示桥丝的比热容, $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$; m_1 表示桥丝质

量, g ; c_2 表示药剂的比热容, $J/(g \cdot K)$; m_2 表示药剂的质量, g ; T_1 表示常温, K ; T_2 表示桥丝的最高温度, K 。

已知桥丝电阻约为 2.25Ω 、比热容为 $0.460 J/(g \cdot K)$ 、质量为 0.08 mg 、药剂的比热容为 $0.864 J/(g \cdot K)$ 、质量为 120 mg , 求得 T_2 为 568.15 K 。硼/硝酸钾反应温度 803 K 左右。从计算结果上看, 设计的电点火具满足安全性要求。

2.1.2 延期体长度计算

药芯直径 3.50 mm , 压药压力 205 MPa , 分次、定量、定压装药^[4]。药剂密度约 3.02 g/cm^3 , 燃速约 1.85 mm/s , 延期体长度为 27 mm , 理论延期时间可满足设计要求。

2.1.4 静电泄放计算

保护通道长 0.8 mm , 空气隙介电强度为 3.93 kV/mm , 击穿电压为 $0.8 \times 3.93 = 3.144 \text{ (kV)}$; 危险通道长 1 mm , 聚四氟乙烯介电强度为 25 kV/mm , 击穿电压为 $1 \times 25 = 25 \text{ (kV)}$ 。危险通道与保护通道的击穿电压之比大于 4, 能够可靠泄放静电。

2.1.5 引燃药的影响

为保证引燃药与长秒量延期药的能量相匹配, 并可靠点火, 选用纯度(95%)更高、粒度($0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$)更小的硼原料, 设计并制备了一种热敏感型硼/硝酸钾点火药, 松装药量($0.060 \pm 0.005 \text{ g}$), 装药密度 2.7 g/cm^3 , 硼粉和硝酸钾选用分析纯, 纯度 $\geq 99.5\%$, 粒度为 300 目, 混药时间 40 min 。对该引燃药爆发点、感度等参数进行测试, 并与许用硼/硝酸钾点火药进行对比, 结果如表 1 所示。

表 1 热敏感型硼/硝酸钾点火药和许用硼/硝酸钾点火药的性能对比

Tab. 1 Performance comparison of heat sensitive B/KNO ₃ ignition powder and allowable B/KNO ₃ ignition powder		
测试项目	热敏感型硼/硝酸钾点火药	许用硼/硝酸钾点火药
5 s 延滞期爆发点/ $^{\circ}\text{C}$	409	510
火焰感度/ cm	5.9	6.7
撞击感度(特性落高 H_{50})/ cm	56.3	47.9
燃烧热/($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)	6.845	6.270

2.1.6 延期体管壳材料和厚度的影响

选用钨系延期药, 质量比 $m(\text{W}) : m(\text{KClO}_4) : m(\text{BaCrO}_4) = 42 : 8 : 50$ 。选取黄铜、钢、胶木和有机玻璃 4 种材料进行横向对比分析, 对比结果如表 2 所示。分别选择壁厚为 $2、4、12 \text{ mm}$ 的金属钢管壳

进行试验^[13], 结果如表 3 所示。

表 2 管壳材料对延期药燃速的影响
Tab. 2 Influence of shell materials on burning rate of the delay composition

材料	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	平均燃速/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	燃速标准差/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
黄铜	109.0	0.90	0.02
钢	49.8	0.87	0.01
胶木	<1.0	0.80	0.09
有机玻璃	<0.1	0.60	0.05

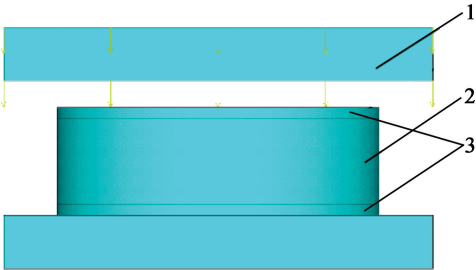
表 3 管壳壁厚对延期药燃速的影响
Tab. 3 Influence of shell wall thickness on burning rate of the delay composition

管壳壁厚/ mm	延期体长/ mm	平均燃速/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	燃速标准差/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	燃速极差/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
12	46	0.78	0.02	0.04
4	46	0.87	0.01	0.04
2	46	0.98	0.01	0.02

2.1.7 泡沫铝仿真

为检验泡沫铝的缓冲性能, 利用 ANSYS/LS-DYNA 进行仿真^[3]。泡沫铝使用 Crushable 本构模型, 直径 3 mm , 厚度 2 mm ; 上、下端各有一块不锈钢板, 直径 3 mm , 厚度 0.2 mm 。上侧刚体以 1 mm/s 的速度匀速向下移动, 作用时间 1 s 。仿真模型如图 5 所示。

使用 LS-PrePost 软件进行后处理分析, 在上端、下端钢板各取一测点 A、B, 分别代表缓冲前、缓冲后的受力大小, 泡沫铝受压状态和 A、B 两点受力大小如图 6、表 4 所示。



1 - 刚体; 2 - 泡沫铝; 3 - 不锈钢板。

图 5 仿真模型

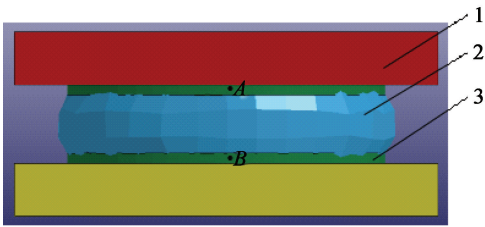
Fig. 5 Simulation model

2.2 分析与讨论

对试验和仿真结果进行分析。
1) 与许用硼/硝酸钾点火药 (GJB 6217—2008) 相比较, 热敏感型硼/硝酸钾点火药中硼粉纯度提

表 4 测点随刚体移动的受压情况
Tab.4 Compression of measuring points with rigid body movement

刚体位移/ mm	A 点受力/ kPa	B 点受力/ kPa	A 点压力梯度/ (kPa · mm ⁻¹)	B 点压力梯度/ (kPa · mm ⁻¹)
0 ~ 0.55	0	0	0	0
0.60	28	6.0	560	120
0.65	45	9.0	340	60
0.70	60	8.5	300	-10
0.75	45	8.0	-300	-10
0.80	2	0.1	-860	-158
0.85	3	0.1	20	0
0.90 ~ 1.00	1	0.1	-40	0



1 – 刚体;2 – 泡沫铝;3 – 不锈钢板。

图 6 泡沫铝受压示意图

Fig.6 Compression diagram of foam aluminum

高、杂质减少、粒度减小,而使组分接触面积增大,导热性更好,外界的火焰冲击传递给药剂的能量被快速释放到环境中。因此,由表 1 可知,热敏感型硼/硝酸钾点火药的 5 s 延滞期爆发点、火焰感度均降低,燃烧热提高了 0.575 kJ/g,约 9.2%。使用该热敏感型点火药作引燃药,可以满足电点火具需求。

2)由表 2 和表 3 可知:延期药在胶木、有机玻璃等有机材料中的燃速比在金属材料中低,但延期精度远不如在金属材料中高;当管壳厚度增加时,管壁吸收更多热量,反应区温度降低,燃速减缓。

3)由表 4 可知,A、B 两点所受压力先增大、后减小。刚体位移 0.60 ~ 0.65 mm 时,A 点压力大小约为 B 点的 5 倍;位移 0.70 mm 时,A 点受力达到最大值 60 kPa;位移 0.80 ~ 1.00 mm 时,A 点受力变化不大,B 点受力不改变。在位移 0 ~ 0.75 mm 部分,B 点压力梯度(单位路程长度上的压力变化)均远小于 A 点压力梯度,证明泡沫铝具有优异的缓冲性能,可以满足抗过载要求。

3 结论

设计了一种抗过载长秒量延期的电点火具。

1)从整体结构安排、压药方式、药剂机械强度、

增加缓冲材料和密封圈、管壳材料等方面综合考虑,该电点火具使用镍铜外壳,保证其抗过载性能,并在内部设计了泡沫铝缓冲材料,厚度为 1.5 mm。

2)通过在点火药和延期药间加入少量过渡药,同时增加延期药压药密度的方法,来实现点火延期,延期体长度为 27 mm,慢速延期药选用钨系延期药,可达到(14.0 ± 0.5)s 的长秒量延期要求。

3)堵、泄结合预防静电。在点火药和壳体之间设计 1.5 mm 宽的绝缘环,在电极塞中部设计 0.2 mm 宽的空气隙,可以有效泄放静电。

参 考 文 献

[1] 孙晓霞,刘卫,沈瑞琪,等. 典型电雷管的聚四氟乙烯抗过载加固方法[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 406-412.
SUN X X, LIU W, SHEN R Q, et al. Reinforcement method of typical electric detonator with PTFE under high overloading[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(3): 406-412.

[2] 蔺美君,贾宁科,刘海旭,等. 一种抗高过载高离心旋转的全密封火焰延期点火管[J]. 火工品, 2018 (5): 1-4.
LIN M J, JIA N K, LIU H X, et al. A full-sealed flash delay igniter with anti-high overload and anti-high centrifugal rotation preperities[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2018(5): 1-4.

[3] 虞跨海,张旭辉,徐红玉,等. 基于数值仿真的引信前冲过载泡沫铝缓冲性能分析[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(6): 1311-1316.
YU K H, ZHANG X H, XU H Y, et al. Numerical simulation of aluminum foam cushion performance analysis on set-forward overload of fuze [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(6): 1311-1316.

[4] 张文平. 一种高精度延期件的研究[J]. 爆破器材, 2018, 47(3): 51-54, 64.
ZHANG W P. Research on a delay element with high precision[J]. Explosive Materials, 2018, 47(3): 51-54, 64.

[5] 李便花, 郝雁军, 潘会平, 等. 某型电点火具静电敏感度发火研究[J]. 新技术新工艺, 2021(5): 42-45.
LI B H, HAO Y J, PAN H P, et al. Research on electrostatic sensitivity ignition of an electric igniter [J]. New Technology & New Process, 2021(5): 42-45.

[6] 王凯民, 温玉全. 军用火工品设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
WANG K M, WEN Y Q. Design of initiators and pyrotechnics for weapon systems [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.

[7] 段进军. 点火具燃烧特性的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.

[8] 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.
WANG K M, ZHANG X S. Engineering design and test technology of initiators & pyrotechnics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.

[9] 陈思文, 刘平, 李贤连, 等. 某延期点火管无火焰输出原因分析与改进[J]. 火工品, 2019(5): 23-24.
CHEN S W, LIU P, LI X L, et al. Analysis and improvement of some delay igniter without flame output [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2019(5): 23-24.

[10] 王海军. 25 ms 等间隔毫秒延期电雷管研究和应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

[11] 史明东, 屈军利, 袁梦笛, 等. 导引头抗高过载技术及其研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(7): 85-89.
SHI M D, QU J L, YUAN M D, et al. Anti-high overload technology and research progress of missile-borne seeker [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(7): 85-89.

[12] 陈瑞民. 电火工品防静电研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

[13] 邵炜华, 杨一帆, 刘继鹏. 某高过载干扰弹头结构强度仿真分析方法研究[J]. 火控雷达技术, 2019, 48(4): 82-86.
TAI W H, YANG Y F, LIU J P. Research on structure strength simulation analysis methods of a jamming warhead under high acceleration conditions [J]. Fire Control Radar Technology, 2019, 48(4): 82-86.

(上接第 38 页)

[19] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.
LIU R J, ZHANG Y W, WEN C W, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55.

[20] 唐烈先, 唐春安, 唐世斌, 等. 静态破碎的物理与数值试验[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 437-441.
TANG L X, TANG C A, TANG S B, et al. Physical experiment and numerical simulation on effect of soundless cracking agent[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 437-441.

[21] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
China Academy of Building Research. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.

[22] 马芹永. 混凝土结构基本原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.