

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.05.006

加速膛孔径对冲击片换能元换能特性的影响*

郭 菲^{①②} 吕军军^② 陈清畴^② 王 窈^② 吴立志^① 黄 辉^② 沈瑞琪^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(四川绵阳,621999)

[摘 要] 加速膛在冲击片换能元中起着剪切飞片和提供飞片加速通道的功能,其孔径对飞片速度形态有重要的影响。本文中,研究不同加速膛孔径对冲击片换能元在不同回路参数条件下的爆发电流和飞片速度的影响规律,并且与数值模拟计算结果进行对比。结果表明,在相同的短路电流峰值和桥箔条件下,加速膛孔径对桥箔的爆发电流没有明显影响,但是对飞片速度有较大影响。加速膛孔径增加,飞片面积增加,飞片速度相应减小;但是飞片面积存在着一个最大值 S_{\max} ,当加速膛孔的面积大于 S_{\max} 时,飞片的面积会保持为一定值,不再随着加速膛孔径的增加而变化,此时加速膛失去剪切飞片的功能,只是保留了提供飞片加速通道的功能,从而导致飞片速度不再发生变化。对于文中的起爆回路和桥区尺寸为 $0.3\text{ mm}\times0.3\text{ mm}\times0.005\text{ mm}$ 的铜桥箔来讲,可以近似认为 $S_{\max}=0.3^2\pi\text{ mm}^2$,对应的加速膛孔径约为 0.60 mm 。研究结果为加速膛的孔径设计范围提供依据。

[关键词] 冲击片换能元;加速膛;飞片速度

[分类号] TJ450.3

Influence of Barrel Diameter on Energy Conversion Characteristics of Exploding Foil Transduction Unit

GUO Fei^{①②}, LÜ Junjun^②, CHEN Qingchou^②, WANG Yao^②, WU Lizhi^①, HUANG Hui^②, SHEN Ruiqi^①
①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)
②China Academy of Engineering Physics (Sichuan Mianyang, 621999)

[ABSTRACT] The flyer plate is sheared off and accelerates through the barrel to the explosive pellet in the exploding foil initiators. So, the flyer shape is related to barrel diameter. Effect of barrel diameter on exploding current and flyer velocity of exploding foil transduction unit was investigated by experiment and simulation. The results show that exploding current is dependent upon barrel diameters under the same discharging and exploding foil parameters. But the flyer velocity decreases as increasing the barrel diameter because of the increased flyer area. Finally, the shearing function of barrel is eliminated, resulting of maximum flyer area (S_{\max}). So, when the barrel diameter increases into a certain extent, the flyer velocity maintains. For the copper exploding foil with the dimension of $0.3\text{ mm}\times0.3\text{ mm}\times0.005\text{ mm}$, S_{\max} would be $0.3^2\pi\text{ mm}^2$ corresponding to 0.60 mm barrel diameter. The investigating results provide design qualification for barrel diameters.

[KEYWORDS] exploding foil transduction unit; barrel; flyer velocity

引言

冲击片雷管(slapper detonator),又称爆炸箔起爆器(exploding foil initiator,简称EFI),是将电能转换为飞片动能,进而引爆炸药的一种高安全、高可靠性火工品^[1],主要由冲击片换能元(反射片、桥箔、飞片、加速膛)、钝感炸药和结构件等组成。冲击片

换能元可以将电能转化为飞片的动能,飞片撞击炸药,这种短脉冲冲击起爆方式实现了钝感、耐热猛炸药在火工品始发药剂中的应用,提高了火工品本质安全性,使其对静电、射频、高空电磁脉冲、闪电、杂散电流等恶劣电磁环境有较强的抵抗能力^[2],也能适应未来战争中复杂的电磁环境,在军事^[3-5]和民用^[7-8]方面都有广泛的应用前景,也是目前国内外主战武器装备中使用的最安全的电火工品。加速膛是

* 收稿日期:2019-05-25
第一作者:郭菲(1981-),男,副研究员,主要从事冲击片雷管等钝感火工品的研制工作。E-mail:guofei@caep.cn

冲击片换能元的重要组成部分,主要起着剪切飞片和提供飞片加速通道的功能,这些功能的实现都依赖于加速膛孔径的设计。为了实现剪切飞片的功能,谭迎新等^[9]认为加速膛的膛孔边缘应该具有非常好的刀刃型结构,以利于剪切飞片,但没有给出加速膛孔径的设计参数范围。王桂吉等^[10]用加速膛孔径 \leq 方形桥箔桥区边长的电炮进行飞片完整性研究时发现,加速膛内孔是否有预制刀口对飞片的完整性影响非常小。Davies 等^[11]认为,有限加速膛(加速膛内孔径 \leq 桥区宽度)的内孔可以起到剪切飞片的作用,而对于无限加速膛(加速膛内孔径 >2 倍桥区宽度)的内孔剪切作用就会弱化,飞片会以类似于吹泡泡的形式产生,对于短加速膛来说,泡泡在破裂之前,飞片前端面已经撞上了炸药,从而失去剪切功能,但是并没有给出实验的证据。所有这些研究结果表明,加速膛剪切飞片功能的实现是需要一定设计边界和前提的。

本文中,通过设计不同孔径的加速膛,采用飞片速度测试和数字模拟计算分析相对比的方法,讨论了加速膛孔径大小对其剪切飞片功能的影响。

1 实验及数值模拟方法

1.1 样品准备

飞片速度的测试元件见图 1,由插接件和基于柔性电路板(flexibal printing circuit,简称 FPC 或软板)工艺制造的集成式冲击片换能元组成,桥箔桥区为正方形。实验样品分为 3 种,加速膛孔径分别为 0.48、0.60 mm 和 0.90 mm,分别为桥箔桥区边长的 1.6、2.0 倍和 3.0 倍;其他参数均相同,见表 1。

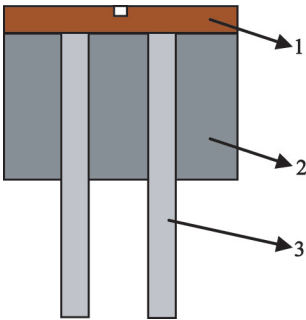


图 1 飞片速度测试用集成式元件

1.2 实验条件及方法

1.2.1 电压电流测试

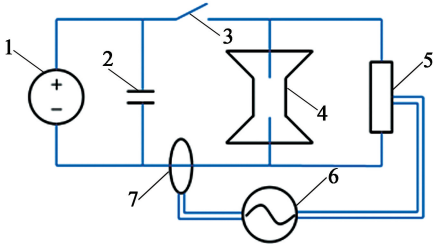
采用罗果夫斯基线圈法测量回路短路电流和桥

表 1 换能元参数
Tab. 1 Parameters of exploding foil transduction unit

桥箔桥区		飞片	加速膛	加速膛孔径
边长/ mm	厚度/ mm	厚度/ mm	孔径/ mm	与桥箔桥区 边长的比值
0.3	0.005	0.04	0.48	1.6
			0.60	2.0
			0.90	3.0

箔爆发过程的回路电流;通过高压探头测量桥箔桥区两端的爆发电压。爆发电压对应的电流即为爆发电流 I_b 。

图 2 是桥箔电爆炸过程电流、电压测量系统示意图。实验测量系统主要由直流电源(德国 FUG 公司,12.5 kV 直流高压电源)、高压电容器(金属化膜)、开关、桥箔、罗果夫斯基线圈(比尔森, P110D 型)、高压探头(美国泰克公司, P5210A)和示波器(美国泰克公司, 7104 型)等部分组成。实验时,首先由直流电源为电容充电。当开关闭合时,电容开始放电,在回路中形成脉冲振荡电流。在脉冲振荡电流的作用下,桥箔发生电爆炸。桥箔爆炸过程中的非线性电阻特性使回路电流和桥箔两端电压发生变化,通过罗果夫斯基线圈和高压探头测量这些变化,并且由示波器记录通过桥箔的电流和桥箔两端的电压。起爆回路参数如表 2 所示。实验时的短路电流峰值 I_p 分别为 1.9、2.3、2.7、3.1、3.5 kA。



1 - 直流电源;2 - 电容;3 - 开关;4 - 桥箔;
5 - 高压探头;6 - 示波器;7 - 罗果夫斯基线圈。

图 2 桥箔爆炸电流、电压测量系统示意图

Fig. 2 Schematic drawing of probing
exploding current and voltage

表 2 起爆回路参数

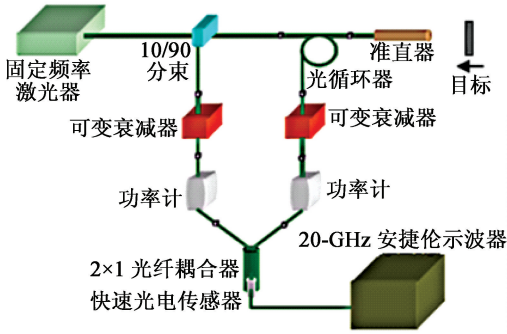
Tab. 2 Parameters of discharging circuit

电容/ μF	回路电感/ nH	回路电阻/ $\text{m}\Omega$	周期/ μs
0.11	404	211	1.43

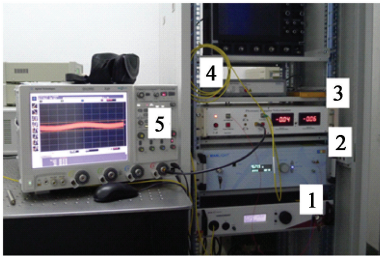
1.2.2 飞片速度测试

采用南京理工大学的光子多普勒速度测量系统(photonic doppler velocimetry, PDV)测量不同短路电

流峰值条件下的飞片速度。光子多普勒速度测量系统主要包括光学系统和信号处理系统两部分如图 3 所示。



(a) 原理示意图



1 - 单频激光器;2 - 功率放大器;3 - PDV 测速仪;
4 - 光探针;5 - 高带宽示波器。

(b) 实物图

图 3 光子多普勒速度测量系统

Fig. 3 Photonic Doppler velocimetry test system

光学系统包括单频激光器（波长 1 550 nm）、10/90 分束器、环形器、光纤、光纤探针、能量监视仪、能量衰减器、二合一光纤耦合器、光电探测器等。信号处理部分包括高带宽示波器和后续计算处理单元等。

工作原理为：测试激光经分束器后，90% 的光经光纤探针入射到测试目标表面，返回来的光经探针收集再经能量衰减器、能量监视仪后与 10% 原始光混频干涉，经光电探测器后转换为高频电信号，由示波器记录。将示波器数据进行软件处理，即可得到测试目标的速度-时间曲线。

计算公式为：

$$v(t) = \frac{\lambda_0 f_b}{2} = \frac{\lambda_0}{2} \cdot \frac{dN}{dt} \quad (1)$$

式中： $v(t)$ 为飞片速度； λ_0 为波长； f_b 为信号光与参考光的频率差，可以通过对干涉信号进行时频分析得到； N 为条纹数。

1.3 数值模拟计算方法

冲击片换能元的作用过程大概可以分为两个过程：桥箔电爆炸过程和驱动飞片加速过程。因此，其

计算模拟方法研究也主要在这两个方面开展。现有物理模型及数值模拟方法可分为以下两类：一类是关于金属箔预爆发特性的数值计算，专门讨论几何因素、电回路参量对金属箔的汽化影响；另一类是关于计算飞片速度的数值计算。

桥箔电爆炸放电回路的瞬态方程为：

$$L \frac{dI}{dt} + RI + R_0 I = U_0 - \frac{1}{C} \int_0^t I(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式(2)中，充电电压 U_0 和电容 C 已知，通过短路实验获得回路集总电感 L 和集总电阻 R ，代入桥箔的动态电阻 R_0 ，最终得出桥箔两端电压和电流曲线，进而计算桥箔爆发过程中沉积的功率和能量。在计算桥箔动态电阻的过程中，根据桥箔的温度变化，桥箔电导率模型采用式(3)~式(5)计算^[12]。

初期加热阶段^[13] ($T < 3\,000\text{ K}$)：

$$\sigma = \frac{10^8}{1.25 + 0.006\,75(T - 250)} \quad (3)$$

本征爆炸阶段^[14] ($3\,000\text{ K} \leq T \leq 8\,000\text{ K}$)：

$$\sigma = \frac{n_e}{n_a^2 \gamma_v z T} \quad (4)$$

式中： n_e 为电子密度； n_a 为原子密度； γ_v 为体积膨胀因子； z 为有效电荷。

等离子体阶段^[15] ($T > 8\,000\text{ K}$)：

$$\sigma = \frac{n_e e^2 \tau}{m_e} \cdot A^\alpha \cdot \frac{\mu}{kT} \quad (5)$$

式中： τ 为电子能量弛豫时间，s； k 为波尔兹曼常量，J/K； μ 为化学势，J； A^α 为与 μ/kT 有关的函数。

通过上述计算，获得桥箔电爆炸过程中的电压、电流曲线，进而获得能量沉积电功率曲线，结合一维不定常流体力学模型，将电功率曲线结果代入，对飞片速度历程进行模拟计算^[16]，可获得飞片速度历程曲线的计算结果。

2 结果与讨论

2.1 加速膛口径对桥箔电爆炸性能的影响

分别在短路电流峰值 I_p 为 1.9、2.3、2.7、3.1、3.5 kA 的条件下，测试 3 种样品的爆发电流 I_b ，并与采用三段式电导率模型和二维金属箔电爆炸模型的计算结果进行对比，结果如图 4 所示。图 4 中， Φ_b 表示加速膛的孔径。

从图4可以看出，随着短路电流峰值在1.9~3.5 kA 的范围内增加，桥箔的爆发电流近似为线性增加，对于桥区尺寸为0.3 mm×0.3 mm×0.005 mm 的铜桥箔来说，在文中的起爆回路条件下，加速

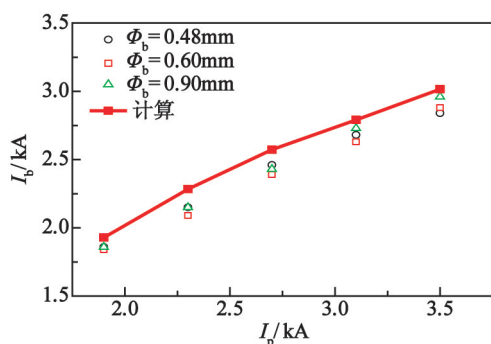


图 4 爆发电流的实验与模拟计算结果

Fig. 4 Measured and predicted results of exploding current

膛孔径在 0.48 ~ 0.90 mm 之间变化时,桥箔的爆发电流基本在同一水平,加速膛孔径对桥箔电爆炸性能没有明显影响。

2.2 加速膛孔径对飞片速度的影响

飞片速度测试 results 和数值模拟计算结果对比如图 5 所示。图 5 中, v_f 表示飞片速度; D 为飞片的飞行距离。

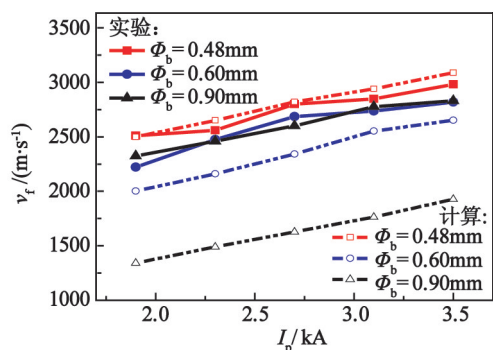
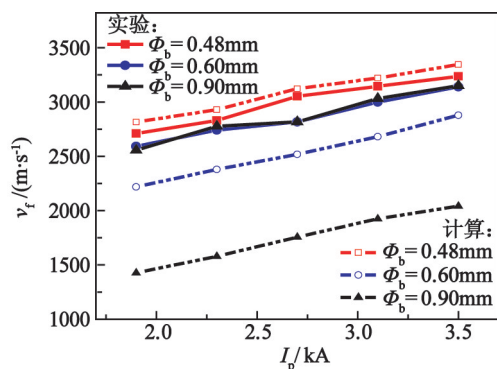
(a) $D = 0.2$ mm(b) $D = 0.3$ mm

图 5 加速膛孔径对飞片速度的影响

Fig. 5 Effect of barrel diameter on flyer velocity

从图 5 可以看出,对于桥区边长为 0.3 mm 的桥箔,在相同的短路电流峰值条件下,当加速膛直径为桥区边长的 1.6 倍时,实验结果与模拟计算结果吻合较好;当加速膛直径从桥区边长的 1.6 倍增加

到 2.0 倍,实验结果和模拟结果都显示飞片速度明显降低,但是计算结果降低得更为明显;当继续增加加速膛直径,将其从桥区边长的 2.0 倍增加到 3.0 倍,实验结果显示飞片速度几乎没有发生变化,而计算结果显示飞片速度进一步明显降低。前面的研究表明,加速膛孔径对桥箔的电爆炸性能没有影响;在桥箔电爆相同的情况下,影响飞片速度的主要为飞片的质量。对文中特定起爆回路和换能元来讲,飞片的厚度一样时,飞片直径就成了影响飞片质量的关键因素。分析认为,造成实验结果和模拟计算结果出现较大差异的原因正是飞片直径的实际状态与计算取值不同导致的。

在模拟计算时,根据冲击片换能元的传统设计思想,认为加速膛的孔径就是飞片的直径,加速膛孔的面积就为飞片的面积,并以此为前提进行模拟计算。在这种情况下,加速膛孔径增加,飞片的直径增加,飞片的面积增加,在飞片厚度不变的情况下,飞片的质量也相应增加,在相同的短路电流峰值和桥箔尺寸条件下,计算得到的飞片速度就会随着加速膛孔径的增加明显降低。对比实验结果发现,当加速膛孔径从 0.48 mm 增加到 0.60 mm 时,实验测得的飞片速度有明显降低,但当加速膛孔径从 0.60 mm 增加到 0.90 mm 时,实验测得的飞片速度几乎没有发生变化。综上所述,加速膛孔径等于飞片直径的假设是有其局限性和适用要求的。

本文中,3 种样品作用后的实验件对比如图 6 所示。从图 6 可以看出,当加速膛孔径从 0.48 mm 增加到 0.90 mm,飞片在加速膛边缘的残留逐渐增多,证明此时加速膛已经失去了剪切功能,而只是提供了加速通道的功能,此时的加速膛的孔径并不等于飞片的直径。随着短路电流峰值的增加,回路提供给桥箔的能量增加,桥箔的爆发越充分,桥箔爆发后产生的能量越多,飞片的形状越规则,加速膛的破坏也越严重;对于相对较小的加速膛,这一现象表现得更为明显。

结合图 5 和图 6 的实验结果,可以假设:当起爆回路、飞片厚度和飞片与桥箔的结合状态一定时,在无加速膛的状态下,一定边长的桥箔能够剪切驱动的面积为一固定值(设为 S_{\max}),当加速膛孔面积小于 S_{\max} 时,可以近似认为加速膛孔的面积即为飞片的面积。增加加速膛孔径,飞片的尺寸增加,飞片的质量相应增加,相同输入条件下飞片的速度就会降低,如本文中加速膛孔径从 0.48 mm 增加到 0.60 mm 的情况;但是当加速膛的孔径继续增加、加速膛

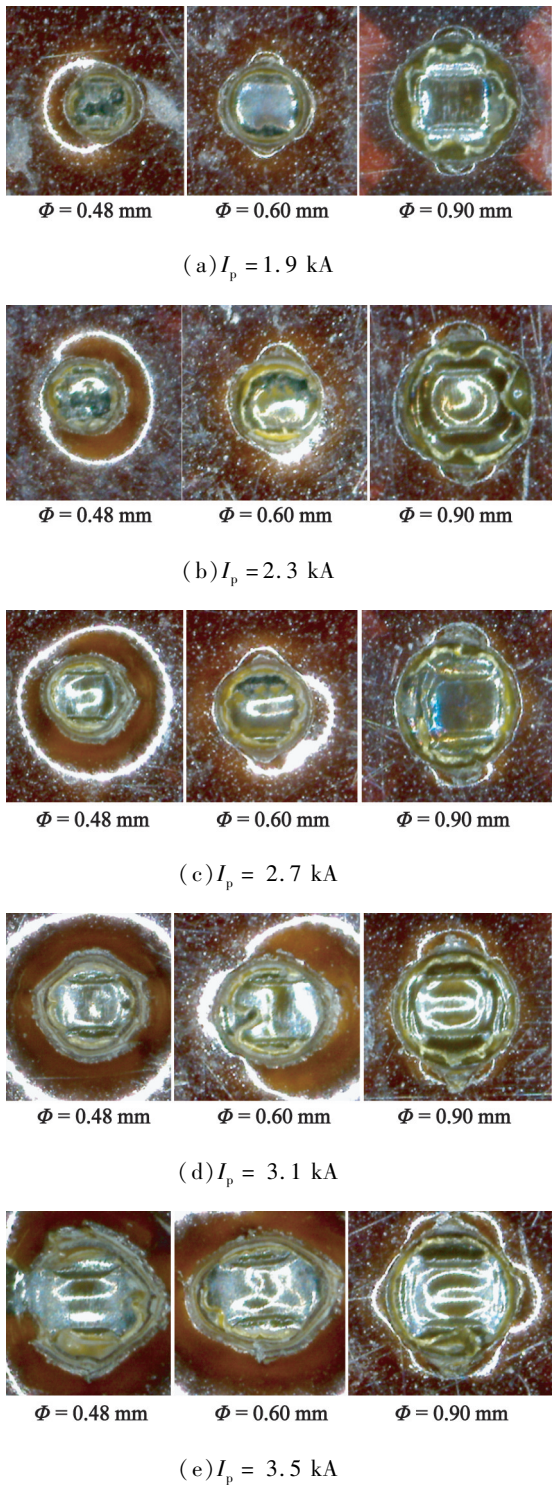


图6 不同短路电流峰值条件下不同加速膛孔径样品作用后对比图

Fig.6 Contrast of samples with different barrel diameters under different discharging current levels

孔的面积大于 S_{\max} 时,飞片的尺寸将不再随着加速膛直径的增加而变化,加速膛将失去剪切飞片的功能,而只保留了飞片加速通道的功能,飞片面积都将近似等于 S_{\max} ,则相同条件下飞片的速度也将会保持基本稳定,不会再随着加速膛孔径的增加而继续

降低,如本文中加速膛孔径从0.60 mm增加到0.90 mm的情况。

综上所述,当飞片面积随着加速膛孔径的增大而增加时,飞片速度会随着加速膛孔径的增大而降低;当飞片面积随着加速膛孔径的增大而不发生明显变化时,飞片速度将会与加速膛孔径无关,而维持在一个定值。对于本文的起爆回路和冲击片换能元来说,可以近似认为 $S_{\max}=0.3^2\pi\text{mm}^2$,即当加速膛孔径 $\leq 0.60\text{ mm}$ 时,飞片的直径可以近似为加速膛的孔径。

3 结论

对于特定的起爆回路和桥箔,加速膛孔径对桥箔的电爆炸性能没有影响;增加加速膛孔径,会增加飞片的面积,从而使飞片的速度降低,但是飞片面积不会随着加速膛孔径的增加而持续增加。对于特定的换能元结构,飞片面积存在着一个最大值 S_{\max} ,当加速膛孔的面积大于飞片面积的最大值时,飞片的面积不再随着加速膛孔径的增大而增加,此时加速膛失去剪切飞片功能,而只是保留了提供飞片加速通道的功能,飞片速度将不再发生变化。对于文中的起爆回路和桥区尺寸为 $0.3\text{ mm}\times 0.3\text{ mm}\times 0.005\text{ mm}$ 的桥箔来讲,可以近似认为飞片面积最大值 $S_{\max}=0.3^2\pi\text{mm}^2$,对应的加速膛孔径约为0.60 mm,研究结果为加速膛孔径设计范围提供了依据。

参 考 文 献

[1] 王凯民. 火工品工程[M]. 北京:国防工业出版社. 2014.

WANG K M. Engineering of initiator & pyrotechnics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.

[2] 商弘藻,杨振英,任西,等. 直列式安全起爆系统电磁环境实验研究与分析[J]. 火工品, 2002(1): 37-40.

SHANG H Z, YANG Z Y, REN X, et al. Study and analysis of electromagnetic environment test of in-line secured ignition system[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2002(1): 37-40.

[3] Excelitas Technologies. Blue Chip TM Detonator[EB/OL]. (2018-08-18) [2019-05-25]. <http://www.excelitas.com/Pages/%20Product/Blue-Chip>.

[4] 唐西虎,陈霞. 新型引爆系统在水中兵器中的应用[J]. 火工品, 2000(4): 43-45.

TANG X H, CHEN X. Application of new initiating system in underwater weapons[J]. Initiators & Pyrotech-

- tics, 2000(4): 43-45.
- [5] NEYER B T, ADAMS J, EDWARDS J C, et al. A low cost, reliable, hermetically sealed, chip slapper detonator suitable for various aerospace applications [C]//Proceedings of 35th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Los Angeles, CA, USA, 1999.
- [6] 王雪艳, 章松桥, 王峰, 等. EFI 雷管技术在石油民爆中的应用[C]//第十六届中国科协年会论文集. 昆明, 2014.
- [7] 李婷婷, 裴东兴, 崔春生. 油气井下冲击片雷管起爆技术研究[J]. 中国测试, 2016, 42(2): 83-87.
- LI T T, PEI D X, CUI C S. Research on exploding foil initiator detonating system in oil and gas well[J]. China Measurement & Test Technology, 2016, 42(2): 83-87.
- [8] Schlumberger. Secure2 RF-Safe Electronic detonator[EB/OL]. (2014-01-21) [2019-05-25]. https://www.slb.com/~media/Files/perforating/product_sheets/wireline_perforating/secure2_electronic_detonator_ps.pdf.
- [9] 谭迎新, 张景林, 王桂吉. 电爆炸导体驱动小飞片起爆技术研究[J]. 兵工学报, 2003, 24(2): 253-256.
- TAN Y X, ZHANG J L, WANG G J. A study on the exploding initiation by electrically exploded conductor driving a small flyer[J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(2): 253-256.
- [10] 王桂吉, 赵剑衡, 唐小松, 等. 电炮驱动 Mylar 膜飞片完整性实验研究[J]. 实验力学, 2006, 21(4): 454-458.
- WANG G J, ZHAO J H, TANG X S, et al. Experimental study on the integrality of mylar flyer driven by electric gun[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(4): 454-458.
- [11] DAVIES H R, CHAPMAN D J, VINE T A, et al. Characterisation of an exploding foil initiator (EFI) system[J]. AIP Conference Proceedings, 2009, 1195: 283-286.
- [12] 赵彦, 曾庆轩, 梁琦. 电爆炸桥箔电导率模型研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(8): 902-906.
- ZHAO Y, ZENG Q X, LIANG Q. Study of theoretical model for conductivity of electric exploding foil[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(8): 902-906.
- [13] KELLER F J, GETTYS W E, SKOVE M J. 经典与近代物理学[M]. 高物, 译. 北京: 高等教育出版社, 1997: 554.
- [14] 韩成智. 电爆炸箔起爆系统作用过程研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2006.
- [15] LEE Y T, MORE R M. An electron conductivity model for dense plasma[J]. Physics of Fluids, 1984, 27(5): 1273-1286.
- [16] ZHAO Y, ZENG Q X, FENG C G. Theoretical model for calculating electric-power curves depicting accelerated flyer by exploding foil[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2010, 19(1): 8-13.

(上接第 28 页)

- nanoparticles on the thermal decomposition of AP, HMX, NTO and composite solid propellants, Part 83[J]. Thermochimica Acta, 2012, 549: 102-109.
- [11] AHMED A E S I, ALI A A, EI-MASRY A M, et al. Development of polyurethane-based solid propellants using nanocomposite materials[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2016, 41: 286-294.
- [12] LIU L L, LI F S, TAN L H, et al. Effects of nanometer Ni, Cu, Al and NiCu powders on the thermal decomposition of ammonium perchlorate[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2004, 29(1): 34-38.
- [13] SINGH G, SENGUPTA S K, KAPOOR I P S, et al. Nanoparticles of transition metals as accelerants in the thermal decomposition of ammonium perchlorate, Part 62[J]. Journal of Energetic Materials, 2013, 31(3): 165-177.