

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.05.006

典型换能元与点火药剂匹配试验研究*

马健行^① 王彦君^② 陈华东^② 徐建勇^③ 黄寅生^① 毛立^①

①南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

②泸州北方化学工业有限公司(四川泸州,646000)

③上海美同安防工程科技有限公司(上海,200090)

[摘 要] 选用桥丝(BW)与金属薄膜(MF)两种镍铬合金换能元,以及 $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$ 与 $\text{Zr}/\text{Pb}_3\text{O}_4$ 两种点火药剂,分别制备了 4 种不同的点火元件。点火元件与 5.8 系发射药制成药包,并在密闭爆发器中点燃,获得相应的压力-时间曲线,以此探讨不同点火药与典型换能元的匹配情况。其中,涂覆有 4.8 mg $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$ 的金属薄膜点火头增压速率为 80.84 MPa/s,而涂有相同质量药剂的桥丝点火头增压速率仅为 68.15 MPa/s。结合高速摄影图像与理论分析认为:换能元的电热转换效率可以在较大程度上影响点火药剂的发火状态;金属薄膜换能元由于具有较为集中的发火区域,因此点火能力相较于桥丝换能元更加稳定; $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$ 药剂的发火状态也比 $\text{Zr}/\text{Pb}_3\text{O}_4$ 药剂稳定。

[关键词] 点火元件;密闭爆发器;发射药;金属薄膜

[分类号] TJ45+3

Matching Experimental Study on Typical Energy Exchange Elements and Ignition Agents

MA Jianxing^①, WANG Yanjun^②, CHEN Huadong^②, XU Jianyong^③, HUANG Yinsheng^①, MAO Li^①

① School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

② Luzhou North Chemical Industry Co., Ltd. (Sichuan Luzhou, 646000)

③ Shanghai Meitong Security Engineering Technology Co., Ltd. (Shanghai, 200090)

[ABSTRACT] Four different ignition elements were prepared by using two kinds of Ni-Cr alloy energy exchange elements, bridge wire (BW) and metal film (MF), and two kinds of ignition agents, $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$ and $\text{Zr}/\text{Pb}_3\text{O}_4$. The ignition elements and 5.8 series propellants were made into charge bags and ignited in a closed explosive to obtain $p-t$ curves, so as to explore the matching relationship between different ignition agents and typical energy exchange elements. The pressurization rate of MF coated with 4.8 mg $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$ is 80.84 MPa/s, while the pressurization rate of BW coated with the same weight agent is only 68.15 MPa/s. Combined with high-speed photographic images and theoretical analysis, it is considered that the electrothermal conversion efficiency of the energy exchange element can greatly affect the ignition state of the ignition agent. Due to the relatively concentrated ignition area, the ignition ability of MF energy exchange element is more stable than that of BW energy exchange element, and the ignition state of $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$ agent is also more stable than that of $\text{Zr}/\text{Pb}_3\text{O}_4$ agent.

[KEYWORDS] ignition element; confined bomb; propellant; metal film

引言

在电火工品中应用的换能元主要有桥丝(BW)^[1]、金属薄膜(MF)^[2-3]和半导体桥(SCB)^[4]。其中,桥丝主要由镍铬合金构成;金属薄膜有镍铬合

金膜、铂膜^[5];半导体桥也分为多晶硅半导体桥^[6]、含能半导体桥^[7]等。Jiang等^[8]设计了一种V型金属膜,测试结果表明,金属膜点火元件满足1A、1W、5 min条件下不点火的安全要求。任小明等^[9]制备了镍铬薄膜换能元,并对其发火性能进行了测试。樊志伟等^[10]对半导体桥裸桥及涂斯蒂芬酸铅(LTNR)

* 收稿日期:2022-03-23

第一作者:马健行(1999-),男,硕士研究生,主要从事火工品技术研究。E-mail:2686837863@qq.com

通信作者:黄寅生(1962-),男,教授,博导,主要从事军事化学与烟火技术研究。E-mail:huangyinsheng@sina.com

时的电爆发火特性进行了研究。

点火元件是实现起爆、点火和做功等功能的重要火工品部件,其药剂的理化因素、点火条件与药剂的匹配关系等均可影响点火过程。在电雷管的相关研究中,桥丝材质及尺寸、药头质量及药剂组分、桥丝焊接状态、药剂与桥丝接触状态等均是影响点火元件发火性能的因素。但目前对于点火元件的研究较多地局限于单一换能元配合点火药剂的点火特性,对不同换能元搭配不同点火药剂的点火关系少有研究。

密闭爆发器试验是测量火药在定容高压下燃烧过程中压力变化规律的一种装置。利用密闭爆发器对同种发射药在不同点火条件下的燃烧过程进行研究,可分析点火条件对发射药燃烧性能的影响。张小兵等^[11]改变了点火能量与电能密度,探究了不同条件下等离子体点火对发射药燃烧的影响。李煜等^[12]对不同点火强度下可燃药筒的燃烧特性进行了研究。

在本文中,以单一种类发射药为试验对象,对不同种类的点火元件进行点火,探究不同点火元件对发射药燃烧性能的影响,从而研究点火药与典型换能元的匹配关系。

1 试验部分

1.1 试验材料

点火药分别为 $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$ 及 $\text{Zr}/\text{Pb}_3\text{O}_4$, 黏合剂为硝化棉。根据前期试验结果,选用较易点燃的 5.8 系双基发射药,形貌为黄色细小颗粒,如图 1 所示。



图 1 5.8 系发射药
Fig. 1 5.8 Series propellant

换能元分别为桥丝和金属薄膜。桥丝选用直径 0.04 mm、电阻率 897 Ω/m 的镍铬合金丝,长度为 2.4 mm。金属薄膜的发热层材料为镍铬合金,厚度 3~6 μm ,长 0.8 mm,宽 0.18 mm;载体层为耐高温玻璃纤维布,表面涂有聚酰亚胺改性环氧树脂作为

胶体层,背面设有铜箔焊接层;载体层与发热层之间使用高温压合工艺进行黏接固化^[13]。具体点火元件实物如图 2;金属薄膜换能元的结构见图 3。

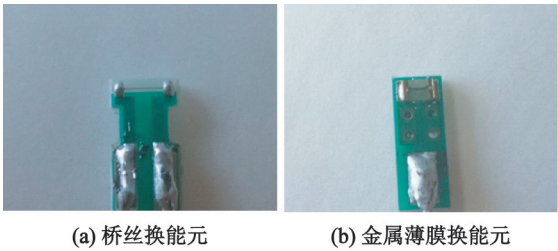
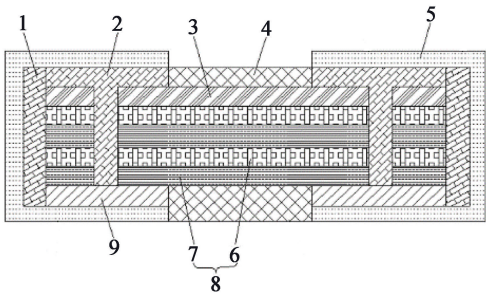


图 2 发火元件实物
Fig. 2 Ignition elements



1 - 第二金属导通层;2 - 第一金属导通层;3 - 发热层;
4 - 光敏环氧树脂层;5 - 镀锡层;6 - 胶体层;7 - 耐高温
玻璃纤维布;8 - 载体层;9 - 铜箔焊接层。

图 3 金属薄膜换能元结构
Fig. 3 Structure of metal film

使用安捷伦 34410A 型数字万用表测量 2 种不带药剂的点火元件的电阻,统计结果见表 1。从表 1 中可以看出,金属薄膜电阻的标准差(0.018 Ω)明显小于桥丝电阻的标准差(0.106 Ω),其电阻分布较为集中。

表 1 两种点火元件的电阻

Tab. 1 Resistance of two ignition elements			
点火元件	测量发数	\bar{R}/Ω	S_R/Ω
桥丝	40	2.354	0.106
金属薄膜	40	1.931	0.018

1.2 试验仪器及原理

试验装置由恒流源、密闭爆发器、压力传感器、电荷放大器和示波器等组成。密闭爆发器标称容积为 25 mL;采用量程 10 MPa、精度 0.3% 的 ZQ-Y 型压力传感器以及 HY1001 型电荷放大器;示波器型号为泰克 MDO3054;恒流源为 DC9801 型智能雷管电参数测试仪。

作为点火系统,恒流源通电激发密闭爆发器内的点火元件;点火药发火并点燃发射药;发射药在密

闭爆发器内燃烧,并生成大量气体。由于密闭爆发器容积较为固定,因此气体压力迅速上升;与此同时,发射药燃烧的反应热使气体温度迅速升高;高温、高压气体作用于压力传感器上,产生电信号,经由电荷放大器放大并输送至示波器中记录;记录数据经处理后得到 $p-t$ 曲线。过程如图 4 所示。

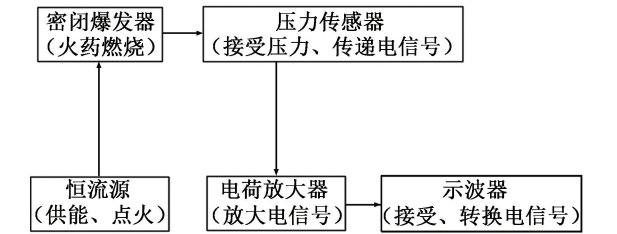


图 4 密闭爆发器试验系统原理

Fig. 4 Principle of confined bomb experimental system

1.3 试验方法

点火药制作方法:称取占点火药质量 5% 的硝化棉放入乙酸乙酯溶液;待乙酸乙酯溶液中的黄色絮状硝化棉完全溶解后,将溶液搅匀;加入点火药各组分,用橡胶棒缓慢搅拌药剂溶液,直至药剂混匀呈浆状且颜色均一。

蘸取浆状点火药涂覆在换能元发火区域,待乙酸乙酯挥发后再进行下一次涂覆。重复此步骤,以获得试验所需点火元件。涂覆药剂前,对点火元件进行编号、称重,以此控制每发点火元件药头质量,获得试验所需药头质量。

每发密闭爆发器试验都采用小药包的形式进行。在密封袋中放入定量的 5.8 系双基发射药,将涂覆有点火药的点火元件一同放入,调整位置,确保点火元件的点火药部分处于发射药中间位置,防止点火药在完全点燃发射药前便烧穿密封袋,影响实验。并用胶带、铁丝将密封袋封闭、固定,防止药包中的发射药漏出以及密封袋体积有较大变化致使试验结果不准确。将点火元件两端的脚线缠至密闭爆发器点火堵头上的点火电极。安装好密闭爆发器后,恒流源通电,点燃药包。为确保每发药包中的点火元件均成功发火及试验过程一致,每发通电条件均设置为 1.000 A、100 ms。点燃药包后,压力传感器将信号传递到示波器上,保存数据,即完成试验。

2 结果与讨论

测量数据中存在耦合噪声干扰,需要对数据进行平滑处理。利用 Origin 绘图软件的平滑功能,使用 Savitzky-Golay 方法,选取适当的窗口点数进行平

滑,得到 $p-t$ 曲线。

2.1 点火药量对压力信号的影响

图 5 为不同药量的金属薄膜-硫氰酸铅点火元件 $\text{MF-Pb(SCN)}_2/\text{KClO}_3$ 点火所产生的 $p-t$ 曲线。可以看出,所有药包在达到最大压力后均会出现一个压力平台,这可以用加热层点火理论解释。

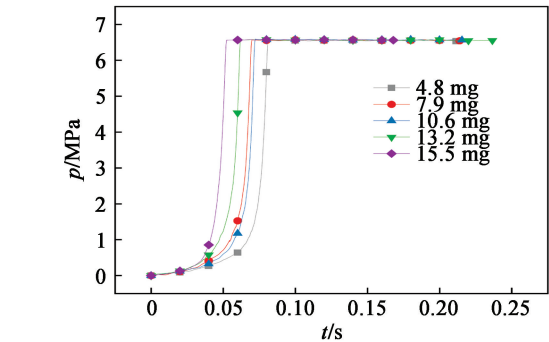


图 5 $\text{MF-Pb(SCN)}_2/\text{KClO}_3$ 点火元件的 $p-t$ 曲线

Fig. 5 $p-t$ curves of $\text{MF-Pb(SCN)}_2/\text{KClO}_3$ ignition element

加热层点火理论^[14-15]认为,火药装药的点燃与持续燃烧不仅需要点火热源将火药表面加热到着火温度,还需要将热量向火药内部传导,形成适当厚度的加热层。因此,建立压力的阶段是点火药的高温产物加热点燃发射药,与发射药扩散燃烧共同作用的结果。压力平台的形成是因为点火药燃烧产物传播结束,仅由发射药燃烧产物继续扩散燃烧,燃烧温度在各点较为统一,从而形成了一个相对稳定的压力,直至药包内某一方向的发射药燃烧完成,压力开始下降。

将压力由开始上升到最大所经过的时间定义为升压时间;将最大压力与升压时间的比值定义为增压速率。增压速率越高,表明点火元件对发射药的点火效能越好。通过图 5 可以看出,随着点火药量的增加,升压时间与增压速率均有一定的提升。为更直观地展现点火药量的增加对药包压力输出的影响,计算得到点火元件的增压速率。以增压速率为 y 轴,所用点火药量为 x 轴得到散点图,对散点图进行线性拟合,得到图 6。

如图 6 所示,随着 $\text{Pb(SCN)}_2/\text{KClO}_3$ 药量的增加,增压速率也基本随之呈现线性上升。这是由于 $\text{Pb(SCN)}_2/\text{KClO}_3$ 点火药燃烧产物中含有 CO_2 、 NO_2 等较多的气体,可依靠气流进行热传导,从而点燃远离点火元件的发射药。因此,药包中发射药的装填密度对其点火效果影响较小。随着点火药量增加,在单位时间内可被点燃的发射药随之上升,因此, $\text{Pb(SCN)}_2/\text{KClO}_3$ 点火药药量与增压速率有较好的线性相关度。

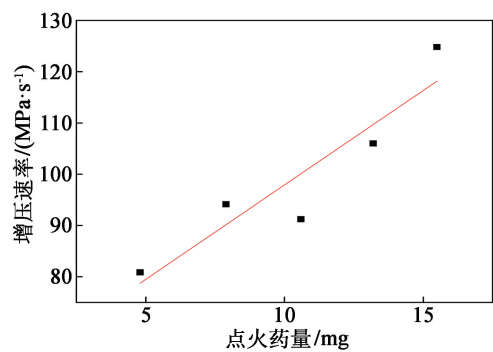


图 6 Pb(SCN)₂/KClO₃ 药量与增压速率的拟合直线

Fig. 6 Fitting line between consumption and pressure rise rate of Pb(SCN)₂/KClO₃

2.2 药剂差异对压力信号的影响

火工品可使用的点火药剂种类较多。药剂组成成分、配比的不同使得药剂之间的比容、燃烧热、残渣率、产气量等各项性能存在较大差异,药剂的点火能力也因此存在差异。

图 7 为相同换能元(金属薄膜)与相同点火药量(4.8 mg)下不同点火药点燃药包获得的 $p-t$ 曲线。由图 7 可明显看出,4.8 mg Pb(SCN)₂/KClO₃ 点火药的增压速率要高于 4.8 mg 的 Zr/Pb₃O₄ 点火药,且 Pb(SCN)₂/KClO₃ 药包的压力平台维持时间长于 Zr/Pb₃O₄ 药包的维持时间。推断出现此种现象的原因为:Zr/Pb₃O₄ 点火药中作为氧化剂的 Pb₃O₄ 性质较为稳定,500 ℃ 才开始分解,而铅粉的着火温度仅为 80 ~ 350 ℃。因此,Zr/Pb₃O₄ 点火药反应初期的氧化还原反应是经由硝化棉引发、铅粉与系统中残余的氧气发生的^[16],铅粉燃烧产生的少量灼热固体残渣点燃发射药,压力开始上升;随着反应的进行,体系温度上升,才发生铅粉与 Pb₃O₄ 的氧化还原反应,从而出现了氧化剂铅粉燃烧热高、但点火药包的整体反应速率慢、增压速率小的现象。

上述推断可由表 2 中的计算数据证实。4.8 mg

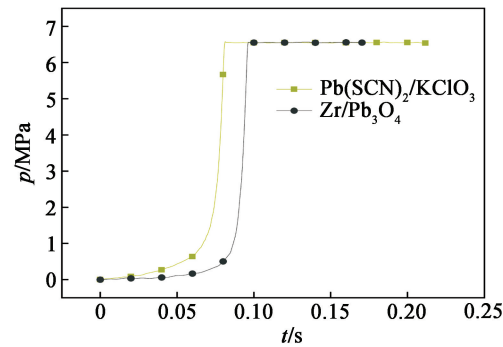


图 7 两种药剂点火后的 $p-t$ 曲线

Fig. 7 $p-t$ curves after ignition of two agents

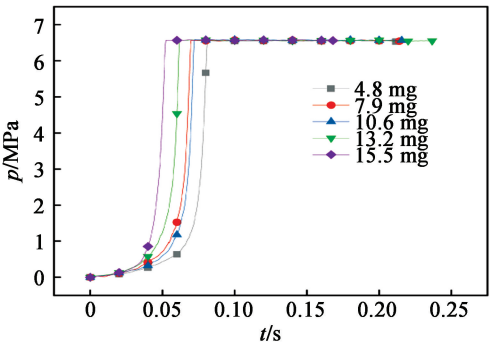
表 2 两种点火药点火后的增压速率

Tab. 2 Pressure rise rate after ignition of two kinds of ignition agents

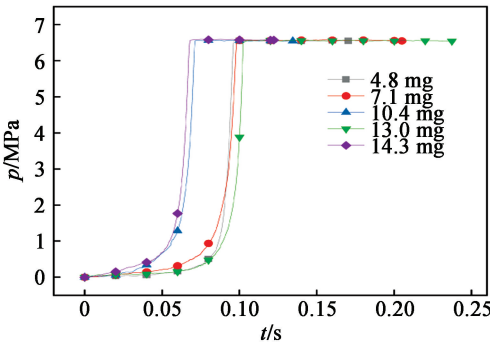
点火药	总增压速率	直线段增压速率
Pb(SCN) ₂ /KClO ₃	80.84	667.84
Zr/Pb ₃ O ₄	68.15	808.04

Pb(SCN)₂/KClO₃ 点火药药包点火后的增压速率为 80.84 MPa/s,Zr/Pb₃O₄ 点火药的为 68.15 MPa/s,符合图 7 中观察得到的结果。由于认为铅粉与 Pb₃O₄ 的主反应未在一开始发生,因此选择压力上升的直线段研究两种药包的增压速率。经计算,Pb(SCN)₂/KClO₃ 药包直线段的增压速率为 667.84 MPa/s,Zr/Pb₃O₄ 药包的为 808.04 MPa/s,符合理论分析。

同样,研究了两种点火药药量增加对发射药燃烧影响的差异,两种药剂点火后的 $p-t$ 曲线见图 8。对比 $p-t$ 曲线可知,Zr/Pb₃O₄ 的增压速率与药量的相关性较小,峰值压力与 Pb(SCN)₂/KClO₃ 药包近似,都在 6.57 MPa 左右。证明两种药包在发火后完全点燃了发射药,实现了发射药的扩散燃烧,因此,在装药条件相同的情况下峰值压力近似相同。



(a) Pb(SCN)₂/KClO₃



(b) Zr/Pb₃O₄

图 8 两种点火药点火后定容燃烧的 $p-t$ 曲线

Fig. 8 $p-t$ curves in constant volume combustion after ignition of two kinds of ignition agents

图 9 是两种点火药药量与增压速率的散点图及拟合情况。 $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$ 药剂药量与增压速率有较好的线性相关性,而 $\text{Zr}/\text{Pb}_3\text{O}_4$ 的药量与其增压速率几乎没有正相关性。结合点火元件发火的高速摄影图像(图 10)与点火药具体组分分析认为:

1) $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$ 点火药发火的燃烧状态较为平稳,且产生了较多气体,因此可与药包内的颗粒状发射药充分交换热量。随着药量的增加,产气量上升,单位时间内点燃的发射药增加,因此,增压速率也随之上升。

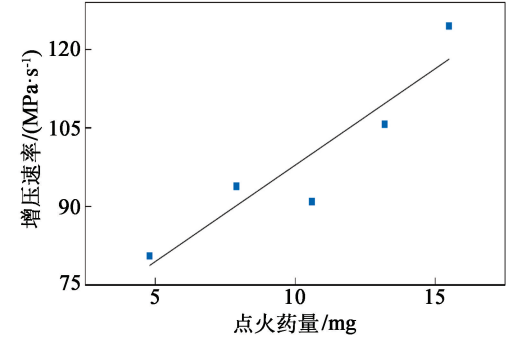
2) $\text{Zr}/\text{Pb}_3\text{O}_4$ 点火药发火时产生了明亮的灼热

固体颗粒(图 10),这在烟火学中往往认为是有利于点燃发射药的。但锆粉本身燃烧过程中易出现爆炸现象^[17-18],药包处于弱约束条件下,燃烧产生的固体颗粒受爆炸影响易发生飞散现象[如图 10(b)],难以在一定区域内形成相对集中的热点。因此,出现点火药量增加但点火效能未上升的情况。

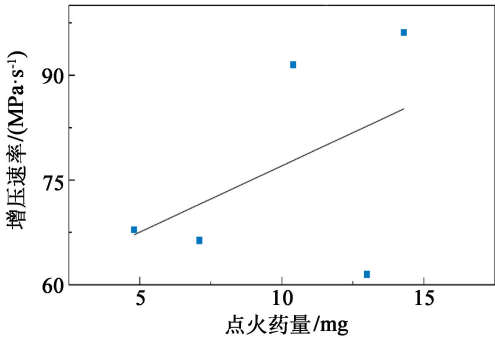
2.3 换能元差异对压力信号的影响

选用桥丝(BW)与金属薄膜(MF)两种镍铬合金换能元,探讨换能元的差异对点火元件点火效能的影响。

图 11(a)为 BW- $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$ 药包的 $p-t$ 曲线。可以看出,相比较于 MF- $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$ 药包,BW- $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$ 药包的 $p-t$ 曲线存在明显的波动。对比两种换能元的 $p-t$ 曲线可以发现:金属薄膜点火元件的直线升压段几乎都发生在 0.050 s 以内,且曲线波动较小;而桥丝点火元件的直线升压段分布不均,从 0.025 ~ 0.100 s 范围内均有分布,说明在桥丝点火元件上点火药量与增压速率的相关性较差,点火效能较低。由图 11(b)同样可以得出,桥丝点火元件上点火药量与增压速率的相关性较差。



(a) $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$



(b) $\text{Zr}/\text{Pb}_3\text{O}_4$

图 9 两种药剂定容燃烧的增压速率

Fig. 9 Pressure rise rate of two kinds of ignition agents in constant volume combustion



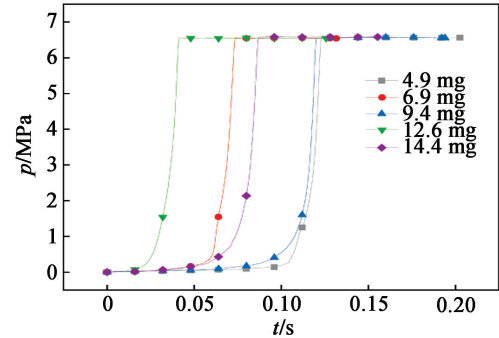
(a) $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$ 点火药



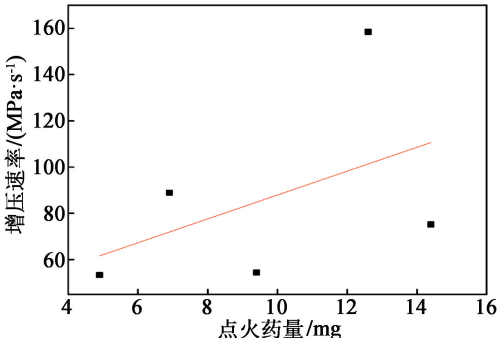
(b) $\text{Zr}/\text{Pb}_3\text{O}_4$ 点火药

图 10 点火元件发火过程

Fig. 10 Ignition process of ignition elements



(a) $p-t$ 曲线



(b) 增压速率与药量关系

图 11 BW- $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$ 的定容燃烧性能

Fig. 11 Constant volume combustion performance of BW- $\text{Pb}(\text{SCN})_2/\text{KClO}_3$

各点火元件点燃药包的密闭爆发器试验结果如表3所示。试验中使用 BW- $\text{Zr}/\text{Pb}_3\text{O}_4$ 点火元件时,

表 3 密闭爆发器试验结果
Tab. 3 Test results in a confined bomb

换能元	点火药	药量/mg	峰值压力/MPa	增压速率/(MPa·s ⁻¹)
金属薄膜	Pb(SCN) ₂ /KClO ₃	4.8	6.578	80.84
		7.9	6.567	94.12
		10.6	6.596	91.19
		13.2	6.587	106.00
		15.5	6.568	124.78
	Zr/Pb ₃ O ₄	4.8	6.560	68.15
		7.1	6.567	66.58
		10.4	6.559	91.76
		13.0	6.564	61.74
		14.3	6.568	96.38
桥丝	Pb(SCN) ₂ /KClO ₃	4.9	6.585	53.40
		6.9	6.544	88.94
		9.4	6.561	54.50
		12.6	6.558	158.48
		14.4	6.581	75.23
	Zr/Pb ₃ O ₄	5.0		
		7.5		
		10.0		
		12.2	6.535	89.21
		15.4	6.577	70.46

有几发未能成功点燃药包。取下药包后发现,未出现破袋、漏药现象,且点火元件表面存在黑色物质,桥丝已熔断,证明该发点火元件成功点燃发火,但药包内的发射药部分呈现出被火焰灼烧后的碳化现象,大部分仍处于未点燃的黄色颗粒。

对此种现象可由计算结合理论进行解释。两种换能元中,金属薄膜换能元与点火药进行热交换的界面为合金层表面,表面积 S_1 为:

$$S_1 = L_1 W = 0.144 \text{ (mm}^2\text{)}。$$
 (1)

式中: L_1 为金属薄膜换能元桥长,mm; W 为换能元桥宽,mm。

桥丝与点火药进行热交换的界面为桥丝的圆柱体侧面,侧面积 S_2 为:

$$S_2 = 2\pi r L_2 = 0.301 \text{ (mm}^2\text{)}。$$
 (2)

式中: r 为桥丝桥径,mm; L_2 为桥丝桥长,mm。

同时,换能元截面处的电阻 R 为:

$$R = \rho \frac{L}{S}。$$
 (3)

式中: ρ 为材料电阻率, Ω/m ; L 为长度,mm; S 为截面积, mm^2 。

取金属薄膜任一微元处电阻为 dR_1 、桥丝任一微元处电阻为 dR_2 。其中,两种换能元均为镍铬合金材料,因此可近似认为 $\rho_1 = \rho_2$ 。可得:

$$\frac{dR_1}{dR_2} = \frac{S_2}{S_1} = 2.09。$$

焦耳定律:

$$Q = I^2 R t。$$
 (4)

式中: Q 为热量,J; I 为电流,A; R 为电阻, Ω ; t 为通电时间,s。

取金属薄膜任一微元处热量为 dQ_1 、桥丝任一微元处热量为 dQ_2 ,可得:

$$\frac{dQ_1}{dQ_2} = \frac{dR_1}{dR_2} = 2.09。$$

由上述计算结果可知,金属薄膜的热交换界面面积明显小于桥丝界面面积,使得金属薄膜电热转换得到的热能相对于桥丝更集中在点火药与换能元的交换界面处;同时,由于任意截面处的金属薄膜电阻均大于桥丝,因此,通电后金属薄膜任一微元产生的热量更高。综合以上两种因素,考虑点火药在金属薄膜热交换界面处单位体积所获得的热量高于在桥丝热交换界面处获得的热量,因此,会出现 Zr/Pb₃O₄ 点火药在金属薄膜上可正常点燃药包,在桥丝上失败的情况。

由于 Zr/Pb₃O₄ 点火药中进行氧化反应,提供反应热量的铅粉含量较少,在点火药用量较低(如 4.8 mg MF-Zr/Pb₃O₄)时,难以在局部形成较多的热点、促进发射药迅速燃烧、产生压力,从而出现低压时间较长、 p - t 曲线不稳定的现象。

同样的,在换能元供给的初始热量较分散(桥丝换能元)的情况下,也难以在短时间内点燃较多

的氧化剂,形成大量热点,致使点火药燃烧却未能点燃发射药,点火失败。

综上,Zr/Pb₃O₄ 点火药与桥丝换能元的匹配程度较差,而在金属薄膜换能元上可获得较好的点火能力。Pb(SCN)₂/KClO₃ 的燃烧反应及药剂性质较为稳定,因此,在桥丝换能元与金属薄膜换能元上均能获得较好的点火效果。但由于金属薄膜能提供较为集中的能量,因此,MF-Pb(SCN)₂/KClO₃ 点火药量与增压速率的相关性较好。

3 结论

研究不同种类换能元与点火药剂匹配关系,能够探明何种点火元件的点火性能较强,可以可靠完成作为电火工品的点火、做功任务,提供更为多样化的点火药剂与换能元选择。

使用典型换能元与点火药剂进行了密闭爆发器试验,测量了相应药包的 *p-t* 曲线,并进行了一定的数值计算。

通过对比点火元件的 *p-t* 曲线与增压速率发现:Pb(SCN)₂/KClO₃ 点火药在金属薄膜换能元上可获得更加稳定的点火能力,点火增压速率上升与药量的增加存在较强的线性关系;Zr/Pb₃O₄ 点火药在金属薄膜与桥丝上的点火能力存在一定的差异。通过理论计算解释了点火能力的差距原因在于换能元的热交换面积及电热转换效率。

参 考 文 献

[1] 强涛. 桥丝式电火工品发火时间与安全电流的预测 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
QIANG T. Study on forecast of the function time and the no-function current of bridgewire electric explosive device [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.

[2] 王广海, 李国新, 阿苏娜. 薄膜桥火工品的制备与性能研究[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 543-546.
WANG G H, LI G X, A S N. Preparation and properties of thin film bridge EED [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(5): 543-546.

[3] 解瑞珍, 任小明, 王可暄, 等. Ni-Cr 桥膜换能元的制备[J]. 含能材料, 2011, 19(5): 584-587.
XIE R Z, REN X M, WANG K X, et al. Fabrication of Ni-Cr film igniting resistor [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(5): 584-587.

[4] 杨正才, 付一鸣, 王科伟, 等. 含能半导体桥在点火中的应用研究[J]. 火工品, 2018(1): 11-14.
YANG Z C, FU Y M, WANG K W, et al. Application

and research on energetic semi-conductor bridge in ignition [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2018(1): 11-14.

[5] 张高飞, 尤政, 胡松启, 等. 基于 MEMS 的固体推进器阵列[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(11): 1489-1492.
ZHANG G F, YOU Z, HU S Q, et al. MEMS-based propulsion arrays with solid propellant [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(11): 1489-1492.

[6] 张文超, 张伟, 徐振相, 等. 半导体桥的研究进展与发展趋势[J]. 爆破器材, 2009, 38(2): 21-24.
ZHANG W C, ZHANG W, XU Z X, et al. Progress and development on semiconductor bridge initiator [J]. Explosive Materials, 2009, 38(2): 21-24.

[7] FAHEY W. An improved ignition device the reactive semiconductor bridge [C]//37th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Salt Lake City, UT, US, 2001.

[8] JIANG X G, ZHANG C F, YU H T, et al. Design and firing and safety performance of metal film igniting component [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2020, 45(5): 770-774.

[9] 任小明, 解瑞珍, 薛艳, 等. Ni-Cr 薄膜换能元点火性能研究[J]. 火工品, 2011(2): 4-6.
REN X M, XIE R Z, XUE Y, et al. Study on firing performance of Ni-Cr film igniting resistor [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2011(2): 4-6.

[10] 樊志伟, 严楠, 贺翔, 等. 小尺寸 SCB 裸桥与涂 LTNR 时的电爆发火特性[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(9): 29-35.
FAN Z W, YAN N, HE X, et al. Electro-explosive ignition characteristics of bare and LTNR coated small-sized SCB [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(9): 29-35.

[11] 张小兵, 袁亚雄, 谢玉树. 等离子体点火密闭爆发器实验研究[J]. 火炸药学报, 2003, 26(2): 24-26, 31.
ZHANG X B, YUAN Y X, XIE Y S, et al. Experimental study on gun propellant plasma ignition in closed bomb[J]. Chinese Journal of Explosive & Propellants, 2003, 26(2): 24-26, 31.

[12] 李煜, 赵成文, 郭德惠, 等. 可燃药筒的定容燃烧特性[J]. 火炸药学报, 2009, 32(4): 75-79.
LI Y, ZHAO C W, GUO D H, et al. Constant-volume combustion properties of combustible cartridge case[J]. Chinese Journal of Explosive & Propellants, 2009, 32(4): 75-79.

[13] 张高源. 片式发热器及其制作工艺: CN20191032-4851.4 [P]. 2020-10-27.

产品抗冲击性能差异较大。A 样品的抗冲击强度 $p_m = 100.74 \text{ MPa}$, B 样品 $p_m = 54.21 \text{ MPa}$; A 样品的电子控制模块抗冲击强度 $p_m = 181.36 \text{ MPa}$, B 样品 $p_m = 54.21 \text{ MPa}$ 。

4) 在生产实践活动中,设计的试验装置及方法可用于对电子雷管和电子控制模块产品抗冲击性能的检测,为电子雷管抗冲击性能检测方法建标奠定基础。

参 考 文 献

- [1] 高朋飞,金鹏,杨翎,等. 电子雷管在光面爆破中的应用[J]. 金属矿山, 2018(12): 56-60.
GAO P F, JIN P, YANG L, et al. Application of electronic detonator to the smooth blasting [J]. Metal Mine, 2018(12): 56-60.
- [2] 贺早亮,刘建刚. 数码电子雷管在水下炸礁中的应用[J]. 工程爆破, 2017, 23(6): 77-81.
HE Z L, LIU J G. The application of digital electronic detonator in underwater reef blasting [J]. Engineering Blasting, 2017, 23(6): 77-81.
- [3] 孟祥栋,王立川,孟令天,等. 小间距下穿高铁隧道控制爆破技术[J]. 工程爆破, 2016, 22(5): 69-76.
MENG X D, WANG L C, MENG L T, et al. Controlled blasting technology of underpass the high speed rail way tunnel with small interval [J]. Engineering Blasting, 2016, 22(5): 69-76.
- [4] 王铭锋,周军. 关于电磁脉冲对电子雷管推广应用影响问题的探讨[J]. 煤矿爆破, 2019, 37(5): 25-27.
WANG M F, ZHOU J. Discussion on the influence of electromagnetic pulse on the popularization and applica-

tion of electronic detonator [J]. Coal Mine Blasting, 2019, 37(5): 25-27.

- [5] 刘忠民,杨年华,石磊,等. 电子雷管小孔距爆破拒爆试验研究[J]. 爆破器材, 2021, 50(5): 39-42.
LIU Z M, YANG N H, SHI L, et al. Experimental study on misfire in small hole-space blasting of electronic detonator [J]. Explosive Materials, 2021, 50(5): 39-42.
- [6] 龚悦,汪旭光,何杰,等. 玻璃微球含量对乳化炸药水下爆炸能量的影响研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2017, 47(5): 443-447.
GONG Y, WANG X G, HE J, et al. Influence of glass microspheres content on underwater explosion energy of emulsion explosives [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017, 47(5): 443-447.
- [7] 宫翔飞,刘文韬,张树道,等. 水下爆炸近场峰值压力的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(4): 1-8.
GONG X F, LIU W T, ZHANG S D, et al. Numerical simulation of peak pressure in near-field underwater explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(4): 1-8.
- [8] 岳彩新. 两种提高工业电子雷管抗冲击性能缓冲材料的试验研究[J]. 煤矿爆破, 2021, 39(3): 1-5.
YUE C X. Experimental study on two kinds of buffer materials for improving shock wave resistance of industrial electronic detonators [J]. Coal Mine Blasting, 2021, 39(3): 1-5.
- [9] 王尹军,颜事留,李玉景,等. 延期雷管的殉爆和抗冲击波性能[J]. 工程爆破, 2008, 14(3): 67-69.
WANG Y J, YAN S L, LI Y J, et al. On sympathetic detonation and anti-shock wave performance of delay detonator [J]. Engineering Blasting, 2008, 14(3): 67-69.

(上接第 37 页)

- [14] 余永刚,薛晓春. 发射药燃烧学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2016.
- [15] 赵宝明,张邹邹,张衡,等. 带延迟点火部件的发射药点火性能试验研究[J]. 火炸药学报, 2016, 39(4): 102-106.
ZHAO B M, ZHANG Z Z, ZHANG H, et al. Experiment research for the ignition performance of gun propellant with ignition delay device[J]. Chinese Journal of Explosive & Propellants, 2016, 39(4): 102-106.
- [16] 孙亚伦,刘璐,任慧,等. 锆粉粒径对锆/高氯酸钾混合点火药热分解性能的影响[J]. 火工品, 2015(4): 34-37.
SUN Y L, LIU L, REN H, et al. The effect of zirco-

num particle size on thermal behaviors of Zr/KClO₄ ignition powder[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2015(4): 34-37.

- [17] MOLODETSKY I E, DREIZIN E L, LAW C K. Evolution of particle temperature and internal composition for zirconium burning in air [J]. Symposium (International) on Combustion, 1996, 26(2): 1919-1927.
- [18] 陈西武. 新型耐水点火药燃烧性能及应用研究[D]. 南京:南京理工大学, 2002.
CHEN X W. A study on combustion performance and application of a new type of water-insensitivity ignition mixture [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2002.