

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.06.005

# 灼热桥丝式电点火药头的发火时间变化规律研究<sup>\*</sup>

孙金梦<sup>①</sup> 卫延安<sup>①</sup> 武寿昌<sup>②</sup>

①南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

②上海芯跳科技有限公司(上海,201101)

**[摘 要]** 使用 F10 数码电子雷管发火测试仪,研究苦味酸钾系电点火药头的发火时间与电容器的输出电压、桥丝直径之间的关系,并通过高速摄影仪拍摄药头的燃烧状况。试验结果表明:在可测试电压范围内,数码电子雷管电点火药头的发火时间随着输出电压的增大而逐渐减小,发火时间极差和标准差也逐渐减小;输出电压大于 15.0 V 后,苦味酸钾系电点火药头的平均发火时间稳定在 0.42 ms 左右,发火一致性很高;直径较小的桥丝电阻较大,桥丝与点火药剂之间的传热效率高,有利于提高电点火药头的瞬发度和发火可靠性;苦味酸钾系电点火药头的火焰明亮,药剂燃烧充分,燃烧时间较长(百毫秒级),点火能力可靠。

**[关键词]** 电点火药头;输出电压;桥丝直径;发火时间;发火一致性;点火能力

**[分类号]** TJ45

Ignition Time Variation of Hot Bridge-Wire Electric Fusehead

SUN Jinmeng<sup>①</sup>, WEI Yan'an<sup>①</sup>, WU Shouchang<sup>②</sup>

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

②Shanghai ChipDance Technology Co., Ltd. (Shanghai, 201101)

**[ABSTRACT]** Relationship between ignition time of the potassium picrate type electric fusehead and output voltage of the capacitor or diameter of the bridge-wire was researched by using F10 digital electronic detonator ignition tester. Combustion process of the fusehead was photographed by a high speed camera. Test results show that within the testable voltage range, ignition time of fusehead of the digital electronic detonator decreases gradually with the increase of the output voltage, and the range and standard deviation of ignition time also decrease gradually. When the output voltage is greater than 15 V, the average ignition time of the potassium picrate type fusehead is stable at about 0.42 ms, and the ignition consistency is very high. Resistance of the smaller diameter bridge wire is larger, and heat transfer efficiency between the bridge wire and the ignition agent is good, which is beneficial to improve the promptness and ignition reliability of the electric fusehead. The potassium picrate type fusehead has a bright flame, full combustion, long combustion duration (hundred milliseconds), and reliable ignition capacity.

**[KEYWORDS]** electric fusehead; output voltage; bridge-wire diameter; ignition time; ignition consistency; ignition capability

## 引言

数码电子雷管使用电子延时芯片取代传统电雷管中的延期药或延期体,实现对延期时间的控制,从而使延期精度和可靠性都有了极大提高<sup>[1]</sup>。经过多年的发展,电子延期技术逐渐成熟,数码电子雷管除了具有延期精度高的优势之外,还对爆破振动的

减振效果显著,并拥有专门的编码程序,可根据需要设定延期时间,方便管理<sup>[2-4]</sup>。目前,桥丝式电引火元件在工业雷管中应用较广泛、技术较成熟。它主要通过电阻丝的电热效应,使桥丝周围的点火药剂点燃。

电点火药头是数码电子雷管的核心部分,其发火性能直接影响着数码电子雷管的爆炸性能。点火药头制造完成后,所需的激发能量是一定的,而由于

<sup>\*</sup> 收稿日期:2022-08-05  
第一作者:孙金梦(1994 - ),女,硕士研究生,主要从事火工品的开发设计研究。E-mail: jinmengsun@163.com  
通信作者:卫延安(1969 - ),男,副研究员,主要从事民爆器材的开发设计研究。E-mail: weiya\_69@163.com

药剂差异与制造工艺差异等因素,导致每发药头之间的激发能量存在细微的区别。因此,对电点火药头输入一定的能量时,批量的药头的发火时间在一定范围内不是某一固定值。已有研究表明,输入能量对电点火药头的发火时间有很大影响:电雷管电点火药头的发火时间随着电流的增大逐渐减小,并且每发药头之间的差异也逐渐减小;当电流达到一定程度之后,药头的发火时间稳定,彼此间的差异甚微<sup>[5-6]</sup>。

国内关于电流对电雷管点火药头的影响已经有了相关研究。对于数码电子雷管,研究人员更关注输出电压对电点火药头的发火时间等的影响。王文斌等<sup>[7]</sup>测试了 4 种不同电阻率的桥丝与二硝基间苯二酚铅系点火药组合时点火药头的发火电压和发火时间,以此研究桥丝直径与点火药头的发火电压、发火时间及发火时间标准偏差之间的关系,试验结果验证了李志雄等<sup>[8]</sup>的理论分析:在一定的桥丝直径范围内,小直径点火药头的发火电压、发火时间及发火时间标准偏差都小。

目前,关于电容器的输出电压对数码电子雷管电点火药头的发火时间的影响规律研究较少。本文中,以苦味酸钾系电点火药头为试验对象,研究其发火时间与电容器的输出电压、药头的桥丝直径之间的关系,总结出药头发火时间的变化规律,并通过高速摄影仪拍摄药头的燃烧状况。

## 1 发火理论

灼热桥丝式电点火药头的发火过程简单描述为:储能电容放电后,桥丝接受能量并升温;同时,桥丝加热周围的点火药剂,达到一定温度后,点火药发生化学变化,自身释放热量并继续升温,加速化学反应直至药头发火;产生的火焰作用于后续的药剂,从而引发电子雷管的爆炸<sup>[9]</sup>。

数码电子雷管使用电容器放电,电流随放电时间的增长而减小<sup>[10]</sup>。理想条件下,电容器对桥丝的输出能量为

$$Q_1 = \frac{CU^2}{2} (1 - e^{-\frac{2t}{\tau}}) \quad (1)$$

式中: $Q_1$  为储能电容输出能量, J;  $C$  为储能电容, F;  $U$  为输出电压, V;  $t$  为放电时间, s;  $\tau$  为放电时间常数, s。

当使用某一配方的电点火药头时,激发药头发火需要一定的能量  $Q_2$ 。假设桥丝升温产生的热量全部用于加热点火药,则

$$Q_2 = \frac{\pi d^2}{4} L \rho c \Delta T \quad (2)$$

式中: $Q_2$  为桥丝升温  $\Delta T$  所需的热量, J;  $\rho$  为桥丝的密度, g/cm<sup>3</sup>;  $L$  为桥丝长度, cm;  $d$  为桥丝的直径, cm;  $c$  为桥丝的比热容, J/(kg · K);  $T$  为电容放电使桥丝上升的温度, K。

电容器放电的时间极短,故加热桥丝的热量损失可以忽略,认为电容器放电的输出能量全部用于加热桥丝。若是电点火药头发火,则至少有  $Q_1 = Q_2$ ,由此可计算得到

$$\Delta T = 0.64 \frac{CU^2}{d^2 L \rho c} (1 - e^{-\frac{2t}{\tau}}) \quad (3)$$

式(3)为灼热桥丝在电容通电下的简单升温模型,未考虑各部分热损失。电容器的放电时间  $t$  极短,一般都小于电点火药头的激发时间,故忽略对药头发火时间的影响。

从式(3)可知,桥丝升温的快慢主要与两部分因素有关:电容器的电容  $C$  及电压  $U$ ;桥丝的材质和尺寸。桥丝升温越快,桥丝与点火药剂之间热量传递越快,电点火药头越易被激发,从而发火时间缩短,发火越可靠。固定选用某一配方的电点火药头和桥丝材质,电容器的设计完成后,电容器电容一定,则电容器的输出电压、药头的桥丝尺寸对电点火药头的发火时间会有较大的影响。

## 2 点火试验

### 2.1 试验原料

苦味酸钾,纯度大于 99.1%,自制;高氯酸钾,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;三硫化二锑,分析纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司;聚乙烯醇 1788,国药集团化学试剂有限公司。

高氯酸钾取 200 目筛下物,三硫化二锑使用行星式球磨机球磨,粒度  $D_{90} = 21 \mu\text{m}$ ;配制质量分数为 8%~10% 的聚乙烯醇水溶液。

### 2.2 试验仪器

电子分析天平,上海菁海仪器有限公司;水浴烘箱,南京理工大学机电厂;磁力加热搅拌器,金坛市城东新瑞仪器厂;发火测试仪,上海兴软信息技术有限公司;高速摄影仪,满幅分辨率  $2\,560 \times 1\,920$ ,选择 2 000 帧/s。

### 2.3 电点火药头的制备

将按配比称量好的高氯酸钾、三硫化二锑放入混合容器,手工干混后过 100 目网筛 3 次;将此二元混合物与无水乙醇按质量比 1:2 加入到混合容器

中,湿混一定时间。出料先风干,再于烘箱内 50 ℃干燥 12 h 以上,直至连续两次称量的质量差不大于 0.001 g。称取干燥好的二元混合物放入混合容器,将称量好的苦味酸钾倒入,在防护装置下混合均匀后,按照每千克点火药加 720~800 mL 黏合剂的原则,加入质量分数为 8%~10% 的聚乙烯醇黏合剂,搅拌均匀。

制作药头时,用尖头竹签蘸取混合好的点火药涂抹桥丝及脚片,分 3 次沾制点火药头,每次先风干,再于 50 ℃的烘箱内干燥 6 h,控制药头的药量在  $(19 \pm 2)$  mg 内。将电阻检查合格、表面光滑的药头放入干燥器中保存。

使用刚性脚片与无模组的 PCB 组合器件(以下简称发火板)制造电点火药头。未沾点火药的发火板及沾好点火药的发火板如图 1 所示。发火板的金属桥丝为镍铬合金丝,桥丝直径有 35、25  $\mu\text{m}$ ,对应的电阻分别为  $(1.50 \pm 0.10) \Omega$ 、 $(3.10 \pm 0.15) \Omega$ 。

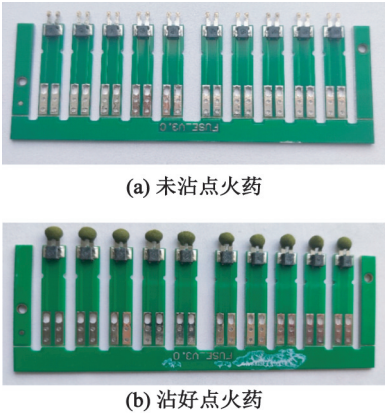


图 1 发火板  
Fig.1 Ignition plates

2.4 试验程序

采用点火测试仪测试电点火药头的发火性能。测试仪器主要由 F10 测试仪、发火夹具、发火板以及光电传感器组成,设计使用的为 120  $\mu\text{F}$  的铝电解电容器。

先将各部分仪器连接起来:将光电感应头接到 F10 测试仪背板的接线柱上,同时,光电感应头用胶带固定在发火测试载具上并正对着药头;用连接线将发火夹具与 F10 测试仪连接起来;将带药头的发火板放到发火夹具上压好。

打开 F10 测试仪的控制面板,设置发火电压,按下“开始发火测试”按键,芯片模块输出充电信号,储能电容开始充电,此时控制面板上显示“正在充电”。充电至设置电压后,芯片模块给出放电信号,电点火药头发火,同时记录下发火时间。

3 结果与讨论

3.1 输出电压对电点火药头发火时间的影响

测试不同输出电压下药头的发火时间及变化规律,输出电压分别为 5.0、8.0、11.0、14.0、15.0、15.5、16.0、16.5 V 和 17.0 V。发火板的桥丝直径为 35  $\mu\text{m}$ ,每个电压下均测试 5 发。发火时间为  $t$ 。作  $t$ - $U$  的变化曲线,如图 2 所示。

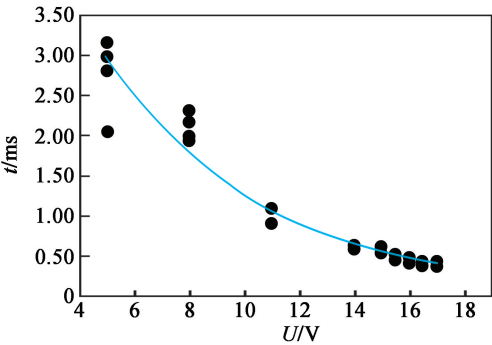


图 2 电点火药头的发火时间随输出电压的变化  
Fig.2 Ignition time variation of the electric fusehead with output voltage

由图 2 可以清晰地看出,随着输出电压的增大,苦味酸钾系电点火药头的发火时间表现出逐渐减小的趋势,发火时间越来越集中,即电点火药头个体之间发火时间的差异越来越小。

随着输出电压的增大,发火时间呈现出指数型降低的趋势。对不同输出电压下点火药头的发火时间变化进行拟合,关系式为: $t = 6.9229e^{-0.169U}$ ,  $R^2 = 0.977$ ,拟合精度比较高。当输出电压小于 14.0 V 时,电点火药头的发火时间随电压增大的变化速率很快;大于 14.0 V 后,发火时间逐渐平缓,最终稳定在一个较小范围内。因此,在桥丝参数固定不变的条件下,每种点火药剂会有一个最小发火时间。

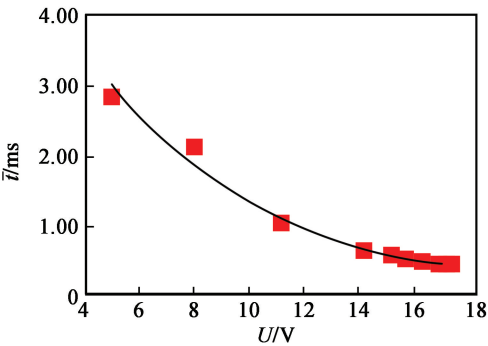
对药头的发火时间数据进行统计分析,得出不同输出电压下药头的平均发火时间 $\bar{t}$ 、发火时间极差  $R$  和标准差  $S$ ,列于表 1。并作相应的  $\bar{t}$ - $U$ 、 $R$ - $U$ 、 $S$ - $U$  曲线,如图 3 所示。

由图 3 可以看出,随着输出电压的增大,电点火药头的平均发火时间、发火时间的极差和标准差都逐渐减小,最后趋于平稳。这表明电点火药头之间发火时间的差异越来越小,发火一致性提高。当输出电压大于 15.0 V 后,点火药头的平均发火时间稳定在 0.42 ms 左右,发火时间的极差和标准差都很小。故在此能量激发条件下,苦味酸钾系电点火

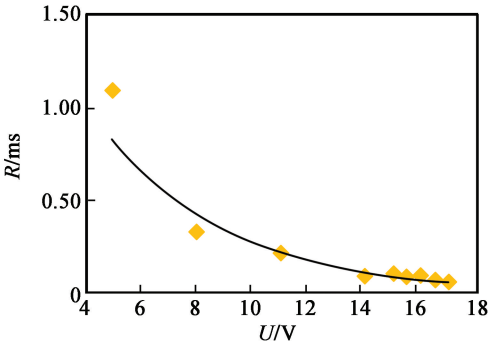
表 1 电点火药头的发火时间参数

Tab. 1 Ignition time parameters of the electric fusehead

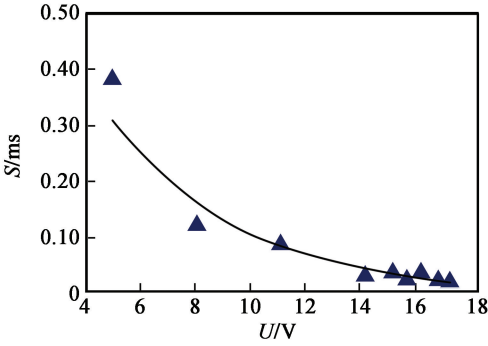
$U/V$	$\bar{t}$	$R$	$S$
5.0	2.80	1.09	0.39
8.0	2.09	0.32	0.12
11.0	1.01	0.21	0.09
14.0	0.61	0.08	0.03
15.0	0.54	0.10	0.04
15.5	0.49	0.08	0.03
16.0	0.46	0.09	0.03
16.5	0.42	0.07	0.02
17.0	0.42	0.06	0.02



(a) 平均发火时间



(b) 极差



(c) 标准差

图 3 电点火药头的平均发火时间 $\bar{t}$ 、发火时间极差  $R$  和标准差  $S$  随输出电压  $U$  的变化

Fig. 3 Average ignition time  $\bar{t}$ , ignition time range  $R$  and standard deviation  $S$  of the electric fusehead changing with output voltage  $U$

药头的最小发火时间在 0.42 ms 左右。

由前述发火理论可知,电容器的输出电压越高,电容器输出的能量越大,桥丝升温越快,桥丝与点火药剂之间的传热效率也越快,从而加速激发电点火药头,缩短发火时间。

3.2 桥丝直径对电点火药头发火时间的影响

分别制成桥丝直径为 35、25  $\mu\text{m}$  的苦味酸钾系电点火药头。输出电压为 8.0 V,利用 F10 发火测试仪测试发火时间,每种药头测试 30 发。对药头的发火时间数据进行统计,列于表 2。

表 2 不同桥丝直径时电点火药头的发火时间参数

Tab. 2 Ignition time parameters of the electric fusehead with different bridge-wire diameters

桥丝直径 $d/\mu\text{m}$	$t_{\max}$	$t_{\min}$	$\bar{t}$	$R$	$S$
35	2.38	2.00	2.21	0.38	0.14
25	1.49	1.12	1.30	0.37	0.11

由表 2 可知,减小桥丝直径,苦味酸钾系电点火药头的发火时间缩短,发火时间的极差和标准差较小,即药头的发火一致性提高。在 8.0 V 的输出电压下,桥丝直径由 35  $\mu\text{m}$  减小至 25  $\mu\text{m}$ ,药头的平均发火时间由 2.21 ms 缩短至 1.30 ms。原因在于镍铬金属桥丝的直径减小,电阻增加,桥丝升温产生的热量积累增多,桥丝与点火药之间的传热量增加,从而加速激发电点火药头,缩短发火时间。因此,其他参数保持一致,选择较细的桥丝,可使桥丝与药头之间的传热效率提高,有利于提高数码电子雷管电点火药头的瞬发度和发火可靠性。

但桥丝直径的选择要考虑桥丝生产工艺的影响:当桥丝直径过小时,桥丝一致性会变差,从而输入每个药头的能量的差异增大,影响发火一致性和可靠性。

3.3 药头发火状态

利用高速摄影仪拍摄苦味酸钾系电点火药头在稳定发火时间下的发火过程,F10 发火测试仪的输出电压为 14.0 V。使用桥丝直径为 35  $\mu\text{m}$  的发火板,发火板平放在发火夹具上,药头朝向高速摄影仪,拍摄距离为  $(1.0 \pm 0.1)$  m。药头的发火过程如图 4 所示。

结果表明:电点火药头在电容放电作用下被激发,发火较为迅速。苦味酸钾系电点火药头的火焰明亮,药剂燃烧充分,固体炽热物多,冒白烟,燃烧时间较长(百毫秒级),点火能力比较理想。



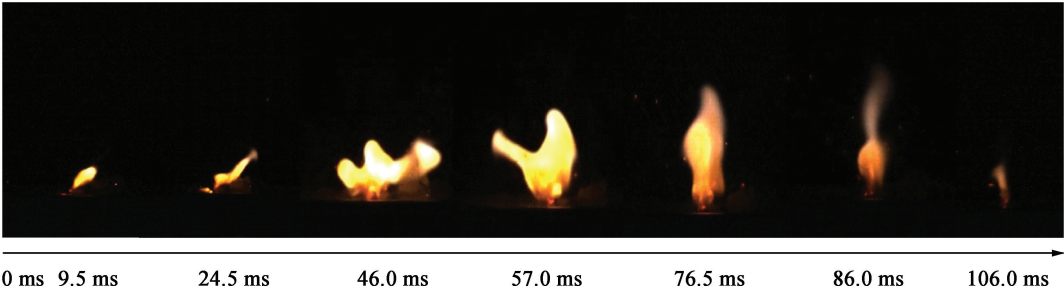


图 4 苦味酸钾系电点火药头的发火过程

Fig. 4 Ignition process of potassium picrate type electric fusehead

4 结论

1)在 5.0 ~17.0 V 的测试电压范围内,随着输出电压的增大,电容器输出能量增大,苦味酸钾系电点火药头的发火时间逐渐减小,发火时间的极差和标准差也逐渐减小,最后都趋于平稳。

2)当电容器输出电压大于 15.0 V 后,苦味酸钾系电点火药头的平均发火时间稳定在 0.42 ms 左右,极差和标准偏差很小,药头的发火一致性高。

3)直径较小的桥丝可以加快桥丝与点火药之间的传热效率,有利于提高数码电子雷管点火药头的瞬发度和发火可靠性。

4)苦味酸钾系电点火药头的火焰明亮,药剂燃烧充分,燃烧持续时间较长(百毫秒级),点火能力可靠。

参 考 文 献

[1] BABU A S, MISHRA K K, KSHIRSAGAR P D, et al. Programmable electronic delay device for detonator [J]. Defence Science Journal, 2013, 63(3): 305.

[2] LI Z G. The design of electronic delay detonator [J]. Advanced Materials Research, 2012, 479/480/481: 1922-1926.

[3] 张万斌,李玉景,张华,等. PHED-1 型电子雷管在露天深孔爆破中的应用[J]. 爆破器材, 2019, 48(2): 47-50, 64.

ZHANG W B, LI Y J, ZHANG H, et al. Application of PHED-1 electronic detonator in open-air deep hole blasting [J]. Explosive Materials, 2019, 48(2): 47-50, 64.

[4] 刘文胜,陈能革,朱末琳,等. 数码雷管高精度延时对爆破振动影响试验研究[J]. 金属矿山, 2021(9): 37-43.

LIU W S, CHEN N G, ZHU M L, et al. Test study on the effect of digital detonator high precision delay time on blasting vibration [J]. Metal Mine, 2021(9): 37-43.

[5] 管延义. 电源输出功率对电雷管发火性能的影响[J]. 煤矿爆破, 2002(2): 25-26.

[6] 高文乐,周奥博,朱常胜,等. 电流对灼热桥丝式电雷管点头发火时间的影响[J]. 爆破器材, 2017, 46(1): 34-37.

GAO W L, ZHOU A B, ZHU C S, et al. Effect of current intensity on the ignition time of hot bridge-wire electric fusehead [J]. Explosive Materials, 2017, 46(1): 34-37.

[7] 王文斌,王兴平,张阳. 一种用于电子雷管的电点火头的研究[J]. 爆破器材, 2016, 45(2): 43-45.

WANG W B, WANG X P, ZHANG Y. Research of a fuse head used for the electronic detonators [J]. Explosive Materials, 2016, 45(2): 43-45.

[8] 李志雄,王文斌. 电子雷管用电引火元件探究[J]. 广东化工, 2016, 43(11): 145-146.

LI Z X, WANG W B. Research of digital electronic detonator with electric ignition devices [J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(11): 145-146.

[9] 韩体飞,邬敦杰,张晔,等. 桥丝式电点头发火能量的输出形式[J]. 火工品, 2016(5): 21-24.

HAN T F, WU D J, ZHANG Y, et al. Firing energy output forms of the bridge-wire fusehead [J]. Initiators and Pyrotechnics, 2016(5): 21-24.

[10] 叶迎华. 火工品技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2014: 73-74.

YE Y H. Pyrotechnics technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 73-74.