高压物理学报

不同发火电压下工业电子雷管引火药头发火时间试验

关佳佳 李洪伟 杨霖 梁昊 刘艳红 卢少宝 朱福元

Experimental Study on Ignition Time of Industrial Electronic Detonator Ignition Head under Different Ignition Voltages

GUAN Jiajia, LI Hongwei, YANG Lin, LIANG Hao, LIU Yanhong, LU Shaobao, ZHU Fuyuan

引用本文:
关佳佳, 李洪伟, 杨霖, 等. 不同发火电压下工业电子雷管引火药头发火时间试验[J]. 高压物理学报, 2025, 39(12):125201. DOI: 10.11858/gywlxb.20251101
GUAN Jiajia, LI Hongwei, YANG Lin, et al. Experimental Study on Ignition Time of Industrial Electronic Detonator Ignition Head under Different Ignition Voltages[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(12):125201. DOI: 10.11858/gywlxb.20251101

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20251101

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

爆炸冲击作用对电子雷管引火药头损伤及发火时间的影响
Effect of Explosive Impact on Ignition Head Damage and Ignition Time of Electronic Detonator
高压物理学报. 2025, 39(6): 065301 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240945

有限空间内桥丝式电点火元件的发火特性
Ignition Characteristic of Bridgewire Electric Ignition Element in Limited Space
高压物理学报. 2025, 39(2): 025102 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240847

电子雷管起爆条件下隧道掏槽孔与辅助孔的延时优化试验研究
Experimental Study on Delay Time Optimization of Tunnel Cutting Holes and Caving Holes under Electronic Detonator Initiation Condition
高压物理学报. 2023, 37(1): 015301 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220638

氢气比例和点火能量对CH_4–H_2混合气体爆炸强度影响的实验研究
Experimental Study of the Hydrogen Proportion and Ignition Energy Effects on the CH_4–H_2 Mixture Explosion Intensity
高压物理学报. 2020, 34(1): 015201 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190803

延期状态下电子雷管电子控制模块的高过载加载实验
Experimental Study on High Overload Loading of Electronic Control Module inside Electronic Detonator under Delayed State
高压物理学报. 2025, 39(1): 014102 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240840

DNAN基熔铸炸药的动态力学行为及点火特性
Dynamic Mechanical Behavior and Ignition Characteristics of DNAN–Based Melt–Cast Explosives
高压物理学报. 2025, 39(5): 054101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240936

DOI: 10.11858/gywlxb.20251101

不同发火电压下工业电子雷管引火药头发火时间试验

关佳佳[1,2], 李洪伟[1], 杨 霖[1], 梁 昊[1], 刘艳红[3], 卢少宝[3], 朱福元[4]

(1. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001;
2. 淮南市公安局, 安徽 淮南 232001;
3. 无锡盛景微电子股份有限公司, 江苏 无锡 214000;
4. 淮南舜泰化工有限责任公司, 安徽 淮南 232001)

摘要: 针对电子雷管发火电容受冲击后出现掉电可能导致其因发火能量不足而无法可靠起爆这一工程实际问题, 通过高速纹影测试系统, 研究了不同发火电压下金属桥膜型及桥丝型引火药头的发火时间, 明确输入引火药头的初始能量对其热分解阶段、火焰增长期、火焰持续期时间的影响, 得到了 2 种引火药头发火总时间与发火电压、发火能量的关系。结果表明: 13～21 V 区间内, 引火药头的发火总时间随电压的变化率呈先减小后增大的趋势; 随着发火电压的增大, 金属桥膜型引火药头的热分解期、火焰增长期、火焰持续期的时间降幅分别为 66.2%、76.6%、15.0%, 桥丝型引火药头在 3 个阶段的时间降幅分别为 28.0%、39.2%、30.0%, 且金属桥膜型引火药头各阶段的发火时间较桥丝型短; 当发火电容剩余能量处于 1.9～4.9 mJ 时, 金属桥膜型和桥丝型引火药头的发火一致性及发火精度受到影响; 当剩余能量小于 1.9 mJ 时, 金属桥膜型引火药头因发火能量不足导致瞎火。研究结果将为电子雷管发火裕度设计提供依据, 有助于降低小孔距爆破中电子雷管的拒爆率。

关键词: 工业电子雷管; 引火药头; 发火时间; 发火能量

中图分类号: TJ453; O521.9 **文献标志码:** A

工业电子雷管凭借其较高的延期精度、有效降低爆破振动等优势, 融合通信、信息存储、现场起爆控制和在线检测等[1] 多项先进功能, 在各类爆破工程中得到了广泛应用。然而, 在隧道等小孔距爆破中, 后爆炮孔中的工业电子雷管会受到先爆炮孔产生的爆炸冲击作用[2], 冲击波会对电子控制模块中的电子元器件等产生影响。

Teverovsky[3] 发现静压作用下片式钽电容的漏电流增大, 同时击穿电压降低。王家乐等[4] 通过水下爆炸测试方法对固态钽电容进行冲击试验, 研究其电压瞬变特性、失效模式和失效机理, 结果表明: 固态钽电容受冲击后出现介电击穿及自愈现象; 电子控制模块的电容器受冲击后出现漏电流及瞬间短路现象, 可能致使发火电容剩余能量无法引燃引火药头, 电子雷管拒爆[5−6]。杨文[7] 通过水下环境对起爆网络中的电子雷管进行不同强度的冲击波试验, 发现剩余电压低于药头发火电压将导致拒爆, 但模块内部组件没有被损坏, 可以重复起爆。孙金梦等[8] 研究发现, 随着储能电容充电电压的增大, 苦味酸钾系及 2 种硝酸肼镍系点火药头的发火时间变短, 最后分别逐渐接近某一常数值, 点火药头的瞬发度和发火一致性提高。杨刚等[9] 采用高速摄影法对单个电点火头、电点火头串联组和电点火头并联组的

* **收稿日期:** 2025-05-30; **修回日期:** 2025-06-21
基金项目: 安徽高校自然科学研究项目(2022AH050838)
作者简介: 关佳佳(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事电子雷管研究. E-mail: 2634473849@qq.com
通信作者: 杨 霖(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事电子雷管研究. E-mail: 2959470747@qq.com

发火过程和发火时间进行研究，发现增大发火电流后，其发火时间明显缩短，且电流达到特定值后的缩短趋势减缓。

发火电容受冲击后，在延期时间内，其两端电压未降至引火药头最小发火电压时，引火药头在最小发火电压与正常起爆电压区间范围内的发火状态尚不清晰，且鲜有不同发火电压对桥丝型引火药头与金属桥膜型引火药头发火状态的对比研究。因此，本研究将制备硫氰酸铅系引火药头[10]，采用高速纹影测试系统，在敞开环境下对不同发火电阻类型的引火药头进行不同发火电压下的发火实验，分析不同发火电压对发火时间的影响，探究不同发火电阻类型引火药头的发火时间与发火能量间的对应关系，以期为电子雷管发火裕度设计提供依据，从而降低小孔距爆破中电子雷管的拒爆率。

1　实　验

1.1　实验准备

在制备完成的硫氰酸铅系引火药头[11−12]末端焊上 2 根航空专用银线，将其倒挂入流场中。银线两端与便携式发火盒连接。测试电压选用 13、15、17、19、20 和 21 V，其中，13 V 为该配方下金属桥膜型引火药头的最小发火电压，21 V 为正常起爆电压。由于桥丝型引火药头的最小发火电压低于 13 V，本研究采用的 13 V 并非桥丝型引火药头的最小发火电压。采用高速纹影测试系统对不同发火电压下引火药头的发火状态进行观测。实验选用电阻阻值为 2 Ω 的桥丝型及金属桥膜型发火电阻，发火电容为容值 22 μF 的钽电容。制备完成的金属桥膜型引火药头和桥丝型引火药头如图 1、图 2 所示。

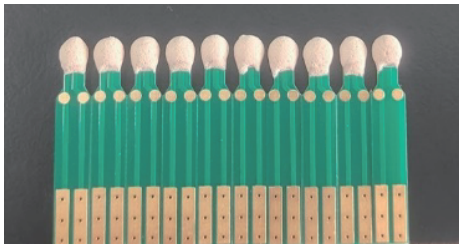

图 1　金属桥膜型引火药头

Fig. 1　Metal bridge ignition head

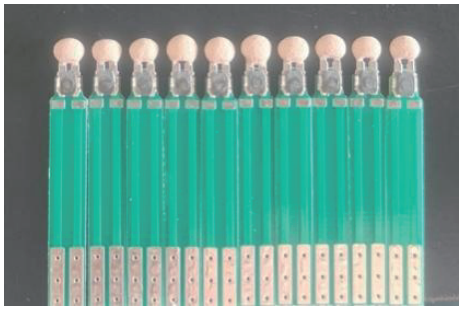

图 2　桥丝型引火药头

Fig. 2　Bridge-wire ignition head

1.2　实验平台搭建

纹影测量的基本原理[13−15]：光线穿过空气中的扰动区域时，会发生折射，这种折射会导致到达相机的光线强度出现显著变化，从而能够清晰地揭示出扰动区域的形态。为了实现对快速变化现象的捕捉，将定制的纹影系统与具有高时间分辨率的型号为 MEMRECAMHX-3 的高速相机相结合，构成高速纹影测量系统。

在实验设置中，采用激光作为点光源。激光首先通过光源狭缝，经反射镜反射到主反射镜 Ⅰ 上。随后，光线经主反射镜 Ⅰ 形成平行光束，并穿过包含可压缩流场的实验区域。当光线穿过这一区域时，将受到扰动影响而发生偏折。最后，光线经主反射镜 Ⅱ 反射，在刀口处形成图像。由于光路的偏折，成像时光照强度将发生变化，最终在高速相机中得到引火药头发火的纹影图像。实验系统原理如图 3 所示。

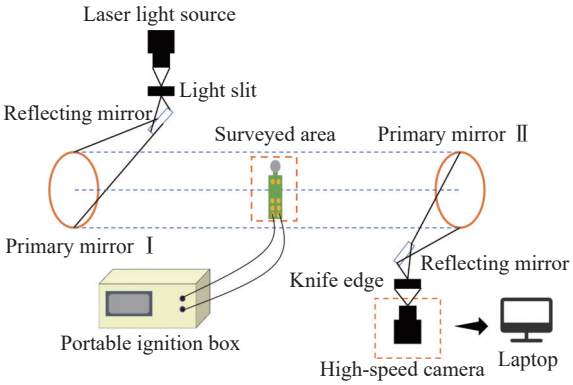

图 3　高速纹影测试系统示意图

Fig. 3　Schematic diagram of high-speed schlieren test system

2　实验结果与分析

引火药头的发火过程涉及电热转化、热传导、热分解、热爆炸等多个物理化学过程，其发火总时间受多种因素的共同作用。电容在一瞬间释放的能量是整个引火药头发火过程中的初始能量，实验通过改变发火电压控制流入体系的初始能量。设置高速摄影的拍摄频率为 20 000 帧/秒。传统意义上的发火时间为电容放电至药头出现火光的时间段，即发火电阻通电向药剂薄层热传导时间及药剂热分解时间之和。本研究将发火时间定义为相对时间，以药头发生反应的前一帧为起始时间（0 ms），只对引火药头的热分解及热爆炸阶段进行研究。

2.1　金属桥膜型引火药头发火过程分析

引火药头在不同发火电压下的发火过程大致相同，可分为热分解阶段（阶段Ⅰ）、火焰增长期（阶段Ⅱ）和火焰持续期（阶段Ⅲ）。不同的是，不同电压下引火药头的发火总时间及各阶段时间存在差异。为方便表述，将金属桥膜型引火药头和桥丝型引火药头分别定义为Ⅰ、Ⅱ型引火药头。通过便携式发火盒控制输入引火药头的发火电压，采用高速纹影系统对Ⅰ型引火药头进行发火实验，如图 4 所示。

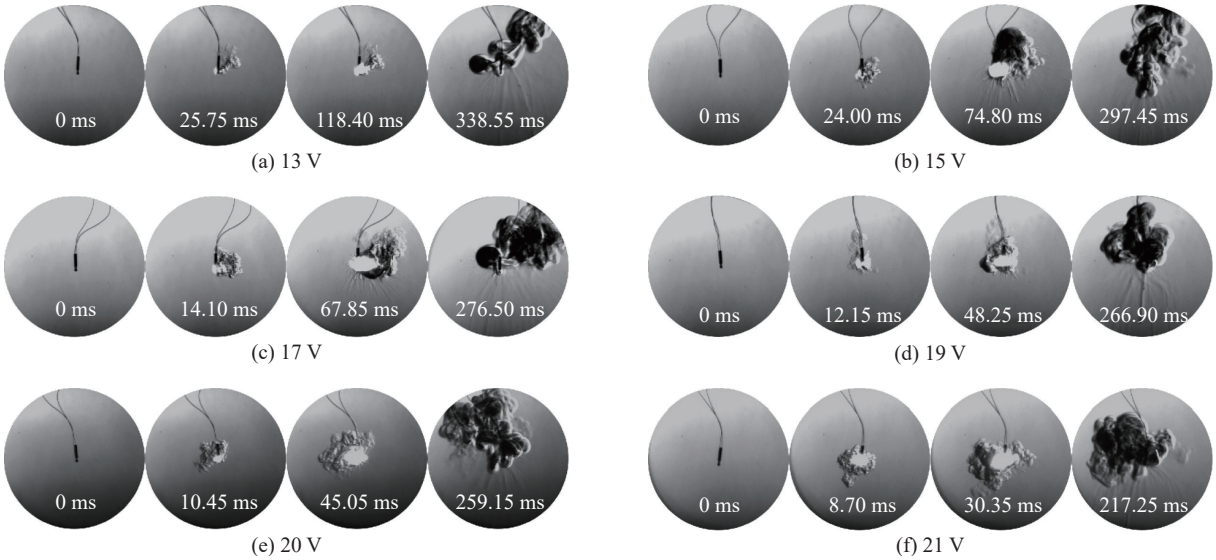

图 4　Ⅰ型引火药头发火过程

Fig. 4　Ignition process of type Ⅰ ignition head

对于Ⅰ型引火药头，当电压为 13 V 时，阶段Ⅰ为 0～25.75 ms，其药剂薄层经发火电阻传热发生反应，产生大量气体，并不断进行热量积累；当电压升至 15、17 V 时，药剂薄层前期的热量积累多于 13 V 电压工况，因而阶段Ⅰ的时间缩短，分别为 0～24.00 ms、0～14.10 ms；当电压为 19、20、21 V 时，药剂薄层的热积累不断增加，阶段Ⅰ反应剧烈，时间明显缩短。不同电压下，Ⅰ型引火药头在阶段Ⅱ的反应时间不同：13 V 电压下，25.75 ms 时引火药头出现火光，经 92.65 ms 后，火焰面积和火焰亮度逐渐达到最大值；当电压为 15、17 V 时，引火药头分别在 24.00、14.10 ms 出现火光，经 50.80、53.75 ms 后，引火药头的燃烧剧烈程度达到最大值；当电压为 19、20、21 V 时，引火药头分别在 12.15、10.45 和 8.70 ms 出现火光，经过约 36.10、34.60 和 21.65 ms 火焰达到最大。阶段Ⅲ中，在 13、15、17、19、20、21 V 电压下，火焰分别持续 220.15、222.65、208.65、218.65、214.10、186.90 ms 后熄灭。

2.2　桥丝型引火药头发火过程分析

通过便携式发火盒控制输入引火药头的发火电压，采用高速纹影系统对Ⅱ型引火药头进行发火实验，如图 5 所示。

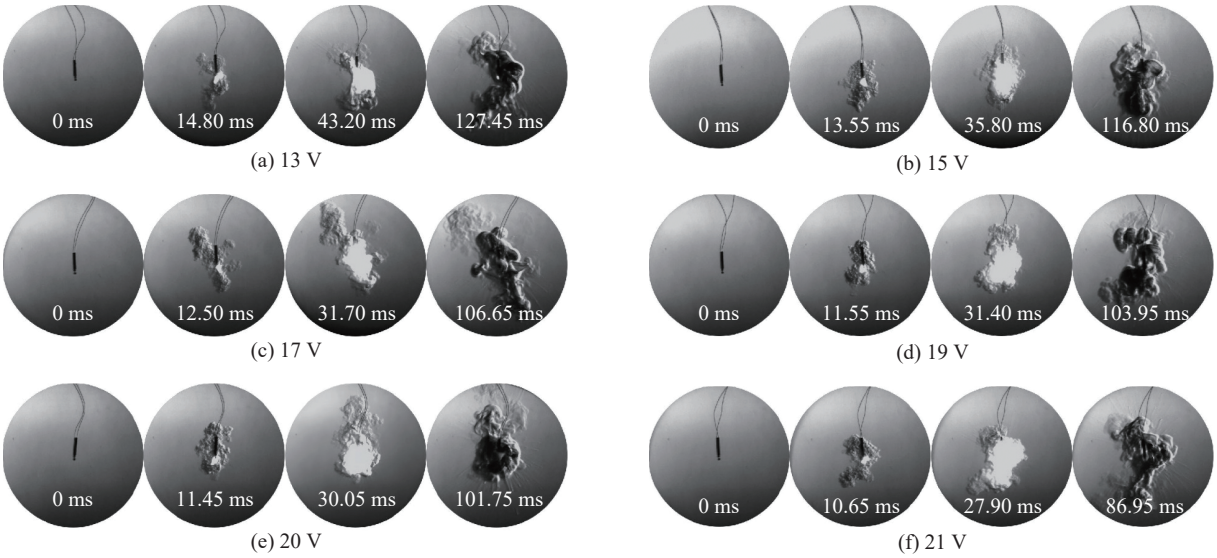

图 5　Ⅱ型引火药头发火过程

Fig. 5　Ignition process of type Ⅱ ignition head

Ⅱ型引火药头与Ⅰ型引火药头的发火过程大致相同，但对应电压下的发火总时间及各阶段时间明显缩短。当电压为 13 V 时，阶段Ⅰ为 0～14.80 ms，Ⅱ型引火药头的药剂薄层同样经发火电阻传热发生反应，产生大量气体并持续积累热量。当电压升至 15、17 V 时，阶段Ⅰ的时间缩短，分别为 0～13.55、0～12.50 ms。19～21 V 电压下阶段Ⅰ的时间明显缩短，药剂薄层的热积累不断增加。对于阶段Ⅱ：13 V 电压下，14.80 ms 引火药头出现火光，经过 28.40 ms 后，火焰面积、火焰亮度逐渐达到最大值；15、17 V 电压下，引火药头分别在 13.55、12.50 ms 出现火光，经 22.25、19.20 ms 后其燃烧剧烈程度达到最大值；19、20、21 V 电压下，引火药头分别在 11.55、11.45、10.65 ms 出现火光，经过约 19.85、18.60、17.25 ms 火焰达到最大。综上所述，在 13、15、17、19、20、21 V 电压下，火焰分别持续 84.25、81.00、74.95、72.55、71.70、59.05 ms 后熄灭。

2.3　引火药头各阶段发火时间及总时间分析

根据Ⅰ、Ⅱ型引火药头各阶段的发火状态，其各阶段发火时间对比如图 6、图 7 所示。阶段Ⅰ的时间受发火电阻对药剂薄层传热效率的影响，初始热量积累越多，药剂达到反应温度的速度越快，阶段Ⅰ的时间越短，反之，则时间越长。

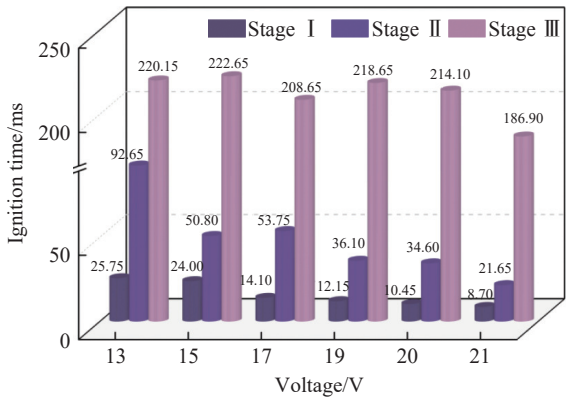

图 6　Ⅰ型引火药头各阶段发火时间对比

Fig. 6　Comparison of ignition times at each stage of type Ⅰ ignition head

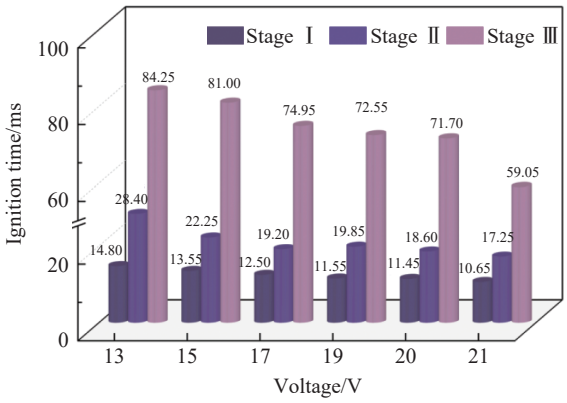

图 7　Ⅱ型引火药头各阶段发火时间对比

Fig. 7　Comparison of ignition times at each stage of type Ⅱ ignition head

以Ⅱ型引火药头为例，将电容器输入桥丝的总热量 Q_1 定义为

$$Q_1 = W_0\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{2t}{\tau}}\right) \tag{1}$$

式中：t 为电容器放电时间，τ 为放电时间常数，W_0 为电容器初始时刻的电能。

桥丝温度由 T_0 升到 T_1 所需的热量为 Q_2

$$Q_2 = \frac{\pi}{4}d^2L\rho c(T_1-T_0) \tag{2}$$

式中：d 为桥丝直径，L 为桥丝长度，ρ 为桥丝密度，c 为桥丝质量热容，T_0 为桥丝的初始温度，T_1 为通电后的桥丝温度。

若不计桥丝传给药剂的热及其他热损失，即电容器放电时输入桥丝的能量全部用于桥丝升温，则 Q_1=Q_2，可得

$$T_1 = 1.27\frac{W_0\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{2t}{\tau}}\right)}{d^2L\rho c}+T_0 \approx 0.64\frac{CU_0^2\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{2t}{\tau}}\right)}{d^2L\rho c} \tag{3}$$

式中：C 为电容器的电容，U_0 为电容器的初始电压。

由式 (3) 可知，桥丝升温与初始电压的平方成正比，初始电压越高，桥丝升温越快，桥丝与药剂薄层的传热效率越高，药剂在单位时间内积累的初始热量越多，达到引火药剂反应温度的时间越短。Ⅰ型引火药头与引火药剂的接触面积以及传热效率均低于Ⅱ型，且桥区热量会分为 2 个部分[16]：一部分传递给焊盘、桥塞和空气；另一部分用于自身升温，且用于自身升温的热量少于Ⅱ型。因此，同一电压下，Ⅰ型在单位时间内的初始热量积累少于Ⅱ型。引火药剂的爆燃需要同时满足 3 个条件：一是温度达到热点临界温度，二是热量大于药剂薄层反应所需能量，三是温度持续一定时间。当与发火电阻紧密接触的药剂薄层经过热传导，进行足够的热量积累达到热点临界温度后，反应自行加速，产生大量气体并释放热量，只有当外层药剂通过热传导获得的热量与内层药剂产生的热量之和大于外层药剂所需的能量后，反应才能进行。因此，初始电压越高，Ⅱ型较Ⅰ型积累的初始热量越多，阶段Ⅰ的时间越短。如图 6 所示：Ⅰ型引火药头在 13～21 V 区间内阶段Ⅰ的时间由 25.75 ms 降至 8.7 ms，降幅达 66.2%，17 V 发生突降，之后，随着初始电压的升高，下降速率变缓；Ⅱ型引火药头在 13～21 V 区间内阶段Ⅰ的时间由 14.8 ms 缓慢降至 10.65 ms，降幅约 28%。

阶段Ⅰ结束后，引火药头发生爆燃，火焰面积、亮度逐渐增大。在 13～21 V 电压下，Ⅰ型引火药头在阶段Ⅱ的时间由 92.65 ms 降至 21.65 ms（降幅 76.6%），Ⅱ型引火药头阶段Ⅱ的时间由 28.4 ms 降至 17.25 ms（降幅 39.2%）。分析认为，阶段Ⅰ结束后，引火药头爆燃初期的能量来源主要依靠阶段Ⅰ所积累的热量及剧烈的氧化还原反应。因氧化还原反应时间较短，产生热量有限，积累热量为能量主体。Ⅰ型引火药头的阶段Ⅰ时间较长，反应速率低于Ⅱ型引火药头，其空穴及裂隙加快了热量散失，因此，同电压下Ⅰ型引火药头的阶段Ⅱ时间明显高于Ⅱ型引火药头。其中，Ⅰ型引火药头的阶段Ⅰ时间在 15、17 V，Ⅱ型引火药头在 17、19 V 均有细微波动，可能是由蘸药不均引起。

火焰达到最大值后，开始维持稳定燃烧，燃烧状态良好。13～21 V 区间内，Ⅰ型引火药头在阶段Ⅲ的时间由 220.15 ms 降至 186.9 ms（降幅 15%），Ⅱ型引火药头由 84.25 ms 降至 59.05 ms（降幅 30%）。

由上述分析可知：初始发火电压不同，使得发火电阻单位时间内的升温速率有所差异，进而影响其与紧密接触的药剂薄层的传热效率，影响引火药剂达到反应温度，导致同一时刻下引火药剂发生热分解反应的热量积累不同，阶段Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的时间有明显变化。不同电压对Ⅰ型引火药头阶段Ⅰ、Ⅱ时间的影响较大，降幅分别达 66.2%、76.6%，对Ⅱ型引火药头阶段Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ时间的降幅分别为 28.0%、39.2%、30.0%。Ⅰ型引火药头的各阶段时间均短于Ⅱ型引火药头。

在每组电压下，对Ⅰ、Ⅱ型引火药头重复 5 次实验，实验数据如图 8 所示。Ⅰ、Ⅱ型引火药头的发火总时间随电压升高呈现先减小后增大的趋势。电压由 13 V 增大到 17 V 的过程中，发火电阻的升温速率逐渐加快，热传导速率提升，阶段Ⅰ前期的热量不断累积，反应速率加快并产生大量气体、释放热

量，直至引火药头发生爆燃，最后熄灭，发火时间总体缩短。17～20 V 范围内，由于阶段Ⅰ反应速率加快，单位时间内气体生成量增大，无法从空穴及微裂隙及时溢出，使得引火药头内部压力升高，高于其强度后，高压气体将部分药剂颗粒带入空中。一方面，产热速率增加、引火药剂的实际燃烧质量减少导致了发火时间缩短；另一方面，部分药剂颗粒从引火药头的薄弱部位带出，增大了散热效率，PVB 板和导线外皮参与燃烧反应产生较浓黑烟，延缓了发火时间缩短的趋势。21 V 电压下，因引火药头的氧化还原反应较为完全，燃烧状态最佳，发火时间随电压的变化而加快缩短。

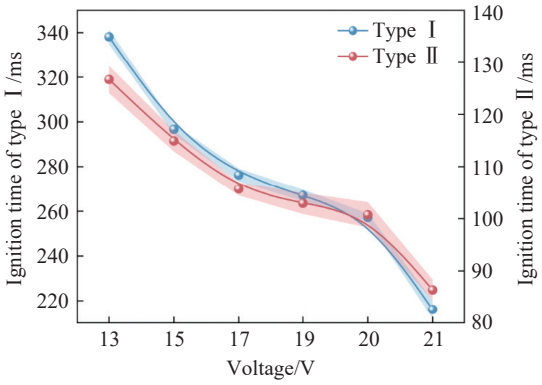

图 8　2 种类型引火药头的发火时间误差

Fig. 8　Ignition time error for two types of ignition head

2.4　发火能量与引火药头的发火可靠性

引火药头发火能量 E 满足以下关系

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \tag{4}$$

式中：C 为 22 μF，U 为发火电压。

13～21 V 对应的发火能量区间为 1.85～4.85 mJ。由于样本量较少，因此，补充实验样本。不同电压对应的引火药头发火能量及发火时间如表 1 所示。

表 1　不同电压对应的引火药头发火能量

Table 1　Ignition energy of ignition corresponding to different voltages

Ignition voltage/V	Ignition energy/mJ	Ignition time of type Ⅰ/ms	Ignition time of type Ⅱ/ms
13.14	1.90	336.51	126.62
13.98	2.15	317.61	123.54
14.77	2.40	301.16	119.29
15.52	2.65	295.63	114.81
16.24	2.90	286.45	109.63
16.92	3.15	283.82	107.15
17.58	3.40	279.15	106.76
18.22	3.65	276.69	106.12
18.83	3.90	274.95	105.73
19.42	4.15	268.46	102.35
20.00	4.40	257.17	101.75
20.56	4.65	235.42	94.16
21.11	4.90	216.07	82.16

Ⅰ、Ⅱ型引火药头发火时间 t_i 随发火能量 E 的变化关系式分别为

$$t_{i1} = -13.697E^3 + 137.54E^2 - 470.05E + 827.69 \tag{5}$$

$$t_{i2} = -13.697E^3 + 137.54E^2 - 470.05E + 827.69 \tag{6}$$

拟合曲线如图 9 所示，其中，R^2 为拟合系数。

由于钽电容的抗冲击性能较强，电容剩余能量与冲击载荷强度无明显关系[17]，且其在冲击载荷作用下的失效为概率性事件。因此，仅研究液态铝电解电容作为工业电子雷管发火电容的实际工况，分

析剩余发火能量与引火药头的发火可靠性。

在工业电子雷管中，当电容完成充电并进入延期状态之后，其能量主要有以下 3 个耗散途径[18]。

其一，用于支撑芯片的正常运作。

$$W_1 = Pt_{\mathrm{tot}} \tag{7}$$

式中：W_1 为总延期时间内芯片消耗的能量，P 为芯片功耗，t_{tot} 为工业电子雷管总延期时间。

其二，涵盖电容遭受冲击前后产生的漏电流以及芯片工作所引发的能量消耗。

$$W_2 = \int_0^{t_1} I_{t_1} U(t)\mathrm{d}t + \int_{t_1}^{t_1+t_2} I_{t_2} U(t)\mathrm{d}t \tag{8}$$

式中：W_2 为漏电流造成的总能量耗散，$U(t)$ 为电容两端电压，I_{t1}、I_{t2} 分别为 t_1、t_2 时间段内电容的漏电流，t_1 为工业电子雷管 Ⅱ 的延期时间，t_2 为工业电子雷管 Ⅰ 与工业电子雷管 Ⅱ 之间的延期时差。

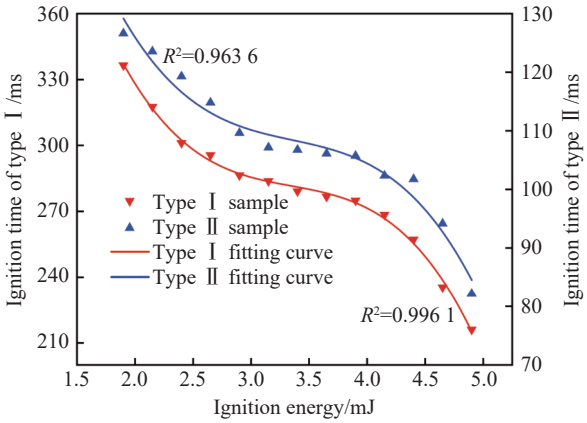

图 9　发火时间与发火能量的关系

Fig. 9　Relationship between ignition time and ignition energy

其三，在受到冲击的情况下，电容出现介电击穿以及自愈过程从而消耗能量。

$$W_3 = \frac{1}{2}CU^2(t_1) - \frac{1}{2}C[U(t_1) - \Delta U]^2 \tag{9}$$

综合上述 3 种途径的能量消耗情况，发火电容的剩余能量可用 E_{R} 来表示

$$E_{\mathrm{R}} = \frac{1}{2}CU^2 - W_1 - W_2 - W_3 \tag{10}$$

当 E_{R} 在 1.9～4.9 mJ 范围内时，Ⅰ、Ⅱ 型引火药头的发火时间受到影响，其发火一致性及发火精度变差，其中：4.0～4.9 mJ 范围内引火药头的发火时间随 E_{R} 的降低而增加；3.0～4.0 mJ 范围内，发火时间的变化幅度较小；1.9～3.0 mJ 范围内，随着 E_{R} 减小，发火时间的增幅大于 4.0～4.9 mJ 范围。当 E_{R} 小于 1.9 mJ 时，输入引火药头的初始能量不足以使药剂薄层加热到发火温度，无法发生反应，进而无法发火。另一方面，输入的初始能量能够使与发火电阻紧密接触的药剂薄层加热到发火温度，但由于温度较低，反应速率较慢，产热速率低于散热速率，导致药剂薄层无法向外层药剂传递热量而瞎火。

3　结　论

在敞开环境下，通过高速纹影测试系统，采用不同发火电压对桥丝型及金属桥膜型引火药头进行发火试验，得到以下主要结论。

(1) 引火药头的发火过程可划分为 3 个阶段：热分解、火焰增长期、火焰持续期。随着发火电压增大，金属桥膜型引火药头 3 个阶段的时间降幅分别为 66.2%、76.6%、15.0%。桥丝型引火药头 3 个阶段的时间降幅分别为 28.0%、39.2%、30.0%。金属桥膜型引火药头各阶段发火时间较桥丝型短。

(2) 引火药头的发火总时间随电压的变化率呈现先减小后增大的趋势。在 13～17 V 发火电压条件下，发火电阻升温速率增大，导致热分解速率增大，产热效率大于散热效率，致使火焰增长期、火焰持续期及发火总时间明显缩短。发火电压为 17～20 V 时，由于热分解导致产热增加，且高压气体将部分药剂颗粒带到空中，减少了药剂实际发火质量，导致发火时间缩短，但部分药剂飞散，加大了散热效率，且 PVB 板参与燃烧反应，延缓了发火时间的减小趋势。21 V 下，引火药剂反应较为完全，燃烧状态最佳，发火电压随电压的变化率加快。

(3) 当 E_{R} 在 1.9～4.9 mJ 范围内时，金属桥膜型及桥丝型引火药头的发火时间将受到影响，影响发火一致性及发火精度。当 E_{R} 小于 1.9 mJ 时，金属桥膜型引火药头因发火能量不足导致瞎火。因未提及桥丝型引火药头的最小发火能量，故不做讨论。

参考文献：

[1] 孙金梦. 数码电子雷管点火模块的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
SUN J M. Study on ignition module of digital electronic detonator [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023.

[2] 杨文, 岳彩新, 宋家良, 等. 工业电子雷管抗冲击性能试验研究 [J]. 火工品, 2022(2): 16–19.
YANG W, YUE C X, SONG J L, et al. Experimental research on the impact resistance of industrial electronic detonators [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2022(2): 16–19.

[3] TEVEROVSKY A. Effect of mechanical stresses on characteristics of chip tantalum capacitors [J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2007, 7(3): 399–406.

[4] 王家乐, 李洪伟, 王小兵, 等. 冲击载荷作用下钽电容的电压瞬变特性及微观机理 [J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(4): 043101.
WANG J L, LI H W, WANG X B, et al. Voltage transient characteristics and microscopic mechanism of tantalum capacitors under impact load [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(4): 043101.

[5] LENG Z D, FAN Y, LU W B, et al. Failure mechanisms of electronic detonators subjected to high impact loading in rock drilling and blasting [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2025, 12(1): 10.

[6] REN D M, HOU J H, DUAN J R, et al. Failure mode analysis of electronic detonator under high overload condition [J]. FirePhysChem, 2022, 2(2): 199–205.

[7] 杨文. 工业电子雷管抗冲击性能研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2022.
YANG W. Research on impact resistance performance of industrial electronic detonator [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2022.

[8] 孙金梦, 卫延安, 武寿昌. 灼热桥丝式电点火药头的发火时间变化规律研究 [J]. 爆破器材, 2022, 51(6): 27–31.
SUN J M, WEI Y A, WU S C. Ignition time variation of hot bridge-wire electric fusehead [J]. Explosive Materials, 2022, 51(6): 27–31.

[9] 杨刚, 彭星新, 孙热, 等. 桥丝式电点火头发火时间一致性试验研究 [J]. 爆破器材, 2024, 53(4): 23–27.
YANG G, PENG X X, SUN R, et al. Experimental study on consistency of ignition time of the bridge wire fuse head [J]. Explosive Materials, 2024, 53(4): 23–27.

[10] 杨霖, 李洪伟, 梁昊, 等. 爆炸冲击作用对电子雷管引火药头损伤及发火时间的影响 [J]. 高压物理学报, 2025, 39(6): 065301.
YANG L, LI H W, LIANG H, et al. Effect of explosive impact on ignition head damage and ignition time of electronic detonator [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(6): 065301.

[11] 马健行, 黄寅生, 毛立. 两种电子雷管用点火元件的制备及研究 [J]. 火工品, 2022(1): 15–19.
MA J X, HUANG Y S, MAO L. Preparation and research of two kinds of electric matchhead for electronic detonator [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2022(1): 15–19.

[12] 任泰昌, 裴霈, 朱方杰. 硫氰酸铅在电子引火元件中的应用探究 [J]. 化工管理, 2019(22): 146–147.
REN T C, PEI P, ZHU F J. Application of lead thiocyanate in electronic ignition components [J]. Chemical Enterprise Management, 2019(22): 146–147.

[13] 郑星, 黄海莹, 毛勇建, 等. 基于高速纹影技术的爆炸冲击波图像测量研究 [J]. 光学精密工程, 2022, 30(18): 2187–2194.
ZHENG X, HUANG H Y, MAO Y J, et al. Research on image measurement of explosion shock wave based on high speed schlieren technology [J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(18): 2187–2194.

[14] GRÜNINGER M, TOEDTER O, KOCH T. Optical analysis of ignition sparks and inflammation using background-oriented schlieren technique [J]. Energies, 2024, 17(6): 1274.

[15] JÓZSA V, MALÝ M, FÜZESI D, et al. Schlieren analysis of non-mild distributed combustion in a mixture temperature-controlled burner [J]. Energy, 2023, 273: 127230.

[16] 焦清介, 赵婉君, 常英珂, 等. 电爆桥膜换能元设计研究 [J]. 火工品, 2023(6): 14–20.
JIAO Q J, ZHAO W J, CHANG Y K, et al. Research on the design of exploding bridge film energy convertor [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2023(6): 14–20.

[17] 王家乐. 电子雷管电容的冲击失效规律及失效机理 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
WANG J L. Impact failure law and failure mechanism of electronic detonator capacitors [D]. Huainan: Anhui University of

Science and Technology, 2024.

[18] 李洪伟, 王家乐, 梁昊, 等. 爆炸冲击对电子雷管发火电容释能特性的影响 [J]. 兵工学报, 2025, 46(3): 240221.
LI H W, WANG J L, LIANG H, et al. Effect of explosion shock on the energy release characteristics of ignition capacitance of electronic detonator [J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(3): 240221.

Experimental Study on Ignition Time of Industrial Electronic Detonator Ignition Head under Different Ignition Voltages

GUAN Jiajia[1,2], LI Hongwei[1], YANG Lin[1], LIANG Hao[1], LIU Yanhong[3], LU Shaobao[3], ZHU Fuyuan[4]

(1. *School of Chemical and Blasting Engineering*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan* 232001, *Anhui*, *China*;
2. *Huainan Public Security Bureau*, *Huainan* 232001, *Anhui*, *China*;
3. *Wuxi Shengjing Microelectronics Co.*, *Ltd.*, *Wuxi* 214000, *Jiangsu*, *China*;
4. *Huainan Shuntai Chemical Co.*, *Ltd.*, *Huainan* 232001, *Anhui*, *China*)

Abstract: In response to the practical engineering problem that the firing capacitor of electronic detonators may lose power after being impacted, which subsequently lead to insufficient firing energy and unreliable detonation, the firing time of metal bridge and bridge-wire ignition heads under different firing voltages were studied through the high-speed schlieren testing system. The influence of the initial energy input to the ignition head on the thermal decomposition stage, flame growth period, and flame duration was clarified, and the relationship between the total ignition time and the ignition voltage and ignition energy for two types ignition heads was obtained. The results show that within the range of 13−21 V, the rate of change of the total firing time of the ignition heads with voltage decreases first and then increases. As the firing voltage increases, the time reduction rates of the thermal decomposition, flame growth period, and flame duration of the metal bridge model ignition heads are 66.2%, 76.6%, and 15.0% respectively. The time reduction rates of the three stages of the bridge-wire ignition heads are 28.0%, 39.2%, and 30.0% respectively, and the firing time of each stage of the metal bridge model ignition head is shorter than that of the bridge-wire. When the ignition energy is between 1.9 and 4.9 mJ, the firing consistency and accuracy of the metal bridge model and bridge-wire ignition head will be affected. When the ignition energy is less than 1.9 mJ, the metal bridge mode ignition heads will fail to fire due to insufficient firing energy. This study provides a basis for the design of the firing margin of electronic detonators, which will reduce the misfire rate of electronic detonators in small-hole blasting.

Keywords: industrial electronic detonator; ignition head; ignition time; ignition energy