

高压物理学报

有限空间内桥丝式电点火元件的发火特性

韩体飞 姜鑫 朱延钰 王猛 刘赛 陈凯强 侯博文

Ignition Characteristic of Bridgewire Electric Ignition Element in Limited Space

HAN Tifei, JIANG Xin, ZHU Yanyu, WANG Meng, LIU Sai, CHEN Kaiqiang, HOU Bowen

引用本文:

韩体飞, 姜鑫, 朱延钰, 等. 有限空间内桥丝式电点火元件的发火特性[J]. 高压物理学报, 2025, 39(2):025102. DOI: 10.11858/gywlb.20240847

HAN Tifei, JIANG Xin, ZHU Yanyu, et al. Ignition Characteristic of Bridgewire Electric Ignition Element in Limited Space[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(2):025102. DOI: 10.11858/gywlb.20240847

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240847>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

点火源参数对旋转爆轰波特征影响的数值模拟

A Numerical Study on the Effect of Ignition Pattern on Wavelet Features in Rotating Detonation Waves

高压物理学报. 2022, 36(6): 062301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220593>

氢气比例和点火能量对CH₄-H₂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 CH₄-H₂ Mixture Explosion Intensity

高压物理学报. 2020, 34(1): 015201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190803>

HMX晶体高温相变及裂纹对点火的影响

Influence of High Temperature Phase Transformation and Cracks on Ignition of HMX Crystal

高压物理学报. 2022, 36(3): 030104 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220550>

基于重大事故场景的受限空间内燃气泄漏情景模拟及泄爆优化研究

Leakage Characteristics of Flammable Gas in Confined Space and the Optimum Design of Explosion Venting: Numerical Simulation on Basis of the Major Accident

高压物理学报. 2023, 37(6): 065201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230658>

强点火作用下C₃HF₇对甲烷-空气爆炸的抑制

Inhibition of Methane-Air Explosion by C₃HF₇ under Strong Ignition

高压物理学报. 2020, 34(2): 025201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190826>

炸药落锤实验及样品厚度效应的三维数值模拟

Three-Dimensional Numerical Simulation of Explosive in Drop Hammer Impact Test and Sample Thickness Effect

高压物理学报. 2021, 35(2): 025301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20200636>

有限空间内桥丝式电点火元件的发火特性

韩体飞, 姜 鑫, 朱延钰, 王 猛, 刘 赛, 陈凯强, 侯博文

(安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 桥丝式电点火头作为常用的点火元件, 在有限空间内的发火特性是其传爆精确性和可靠性的体现。通过制备测试样品模拟桥丝式电点火头发火的有限空间, 设计桥丝式电点火元件发火参数测试系统, 测试了电点火元件发火过程的时间结构、有限空间内气体压力以及发火光强等参数; 采用高速相机拍摄电点火元件发火的动态过程, 建立了电点火元件有限空间内发火动态过程的物理模型。研究表明: 随着点火电压的增大, 桥丝的相变时间缩短, 等离子体阶段的持续时间增加, 随后趋于稳定, 电点火头的发火时间在 5.6 ms 左右波动, 发火压力时间及发火光强时间在 3.0~5.0 ms 范围内有界波动。点火电压达到 20 V 后, 发火特性参数趋于稳定, 能够可靠输出均匀的点火能量, 用于点燃下一序列装药。在气室有限空间内, 电点火元件发火动态过程可分为桥丝升温加热药剂、药剂发火、热流扩散和冲击波反射 4 个阶段。

关键词: 有限空间; 电点火元件; 发火压力; 点火电压

中图分类号: O389; O521.9

文献标志码: A

桥丝式电点火元件具有良好的发火性能, 因而被广泛应用于工业雷管、火箭及导弹等的点火装置中, 其工作环境涉及高过载、强冲击以及极端温度等复杂条件。研究桥丝式电点火元件的发火特性并揭示其内在机理, 对于提高雷管及点火装置在极端条件下的发火可靠性和安全性具有重要的理论意义。

桥丝式电点火元件的发火特性受多种因素影响, 国内外学者对其进行了大量的理论和实验研究。成一等^[1]将电点火头的发火过程分为桥丝升温、点火药吸热分解和爆燃 3 个阶段, 王鹏等^[2]将其进一步简化为升温和爆炸阶段。高文乐等^[3]、孙金梦等^[4]分别研究了电流和电压对桥丝式电雷管电点火头发火时间的影响, 发现电点火头的发火时间随电流和输出电压的增大而减小, 最后趋于稳定, 电点火头的发火一致性也逐渐增强。学者们对爆炸桥丝雷管(explosive bridge wire, EBW)的起爆机理进行了大量研究。Lee 等^[5-7]从电特性、桥丝输出能量、爆炸起爆特性 3 个方面展开研究, 确定了引爆桥丝所需的能量, 并利用桥丝起爆时的膨胀速度和冲击波压力表征其输出能量, 总结了爆炸桥丝雷管的起爆机制。Smilowitz 等^[8]设计了一种测试 EBW 功能的新方法, 在传统的单一电压、电流加载下, 增加了可见光发射、X 射线透射、质子射线摄像和温度测量等方法, 进一步研究了 EBW 的作用机制。多数研究认为, 桥丝电爆炸发生在电压峰值和电流拐点, 但 Valancius 等^[9]的研究发现, 峰值功率前的能量密度能够更好地表征 EBW 的爆炸性能, 桥丝电爆炸应定义在功率的峰值。

目前, 关于点火电压对桥丝式电点火元件发火时间历程及发火性能参数综合过程的研究鲜有报道。为此, 本研究拟设计一种测试电点火元件发火性能参数的测试系统, 测试桥丝式电点火头在有限空间内的发火性能参数, 研究点火电压与发火性能的关系, 利用高速相机观察电点火头的发火状态, 构

* 收稿日期: 2024-07-08; 修回日期: 2024-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(51604009); 安徽理工大学国家级大学生创新训练项目(202310361049); 安徽理工大学 2023 年研究生创新基金(2023cx2117)

作者简介: 韩体飞(1983—), 男, 博士, 高级实验师, 主要从事民爆器材与爆破技术研究。

E-mail: tifeihan9797@126.com

通信作者: 姜 鑫(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事火工品研究. E-mail: 3380299886@qq.com

建电点火元件发火的物理模型,揭示桥丝式电点火元件发火的内在机制,以期点火装置在极端环境下的适应性研究提供实验方法和理论基础。

1 桥丝式电点火元件发火机理

桥丝式电点火元件通电后,桥丝自身的物理状态发生急剧变化,并迅速把电能转化为其他形式的能量,如热能、等离子体辐射能、冲击波能等,发生电爆炸现象。桥丝电爆炸可分为桥丝加热熔化、汽化以及等离子体 3 个阶段:第 1 阶段,桥丝加热升温,温度达到桥丝的熔化温度时,桥丝逐渐熔化,由固态变为液态;第 2 阶段,桥丝熔化后,电阻不断增大,在焦耳热的作用下温度快速升高,熔融态的桥丝逐渐转变为气态,此阶段桥丝两端的电压和流经桥丝的电流快速增大,完全汽化时电阻达到最大值,电压也达到峰值,发生爆炸;第 3 阶段,在持续的加载作用下,爆炸产物开始碰撞电离,气态的桥丝逐渐形成等离子体,此时电阻急剧减小,电压和电流也从峰值持续下降^[10-13]。

桥丝式电点火元件的发火特性和发火稳定性与气室温度、压力等有密切关系。点火药剂的燃烧存在复杂的传热过程^[14],药剂发生化学反应产生的热量通过热传导及燃烧气体产物的扩散作用向整个电点火元件表面传递,在有限空间内,气体产物不断充满整个气室,温度和压力不断上升到平衡工作条件。点火药燃速 u 与压力 p 的关系为

$$u = a + bp^n \quad (1)$$

式中: a 、 b 为经验常数, n 为燃速压力指数。 n 、 a 和 b 的值取决于点火药配方、燃烧室的压力和温度。由式 (1) 可知,压力越大,点火药燃速越快。当压力达到平衡工作条件后,点火药的点火反应趋于稳定,电点火元件的发火越可靠。

2 实验

2.1 测试样品及制备

测试样品由管壳、电点火头、透明有机玻璃块制成,其中管壳气室部位开有压力信号输出孔;电点火头药剂由苦味酸钾、硫化锑、高氯酸钾组成;采用气动卡口机在电点火头部位和有机玻璃块处卡印封口制成测试样品,结构如图 1 所示。

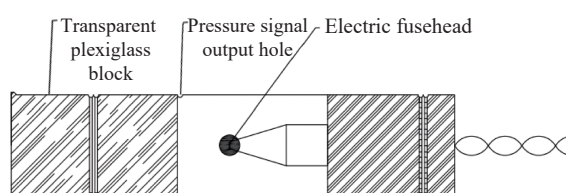


图 1 测试样品的结构

Fig. 1 Structure of the tested sample

2.2 发火参数测试系统设计

测试系统主要包括直流稳压电源、示波器、压力传感器、光电传感器、恒流源及固定模具等,如图 2 所示。采用高速相机拍摄桥丝和电点火头发火过程。

采用的主要仪器设备有: RNX-605D 型直流稳压电源(深圳市兆信电子设备有限公司生产),电压输出范围为 0~60 V; HDO4034 型数字示波器(美国力科公司生产),带宽为 350 MHz,采样率为 2.5 GS/s; 113b24 型压力传感器(美国 PCB 公司生产);光电传感器为 3DU33 型硅光敏三极管,最大功率为 70 mW; 482C05 型恒流源(美国 PCB 公司生产),通道数 4 个,电流可调节范围为 0~20 mA; HX-3 型高速相机(NAC Image Technology 公司生产)。

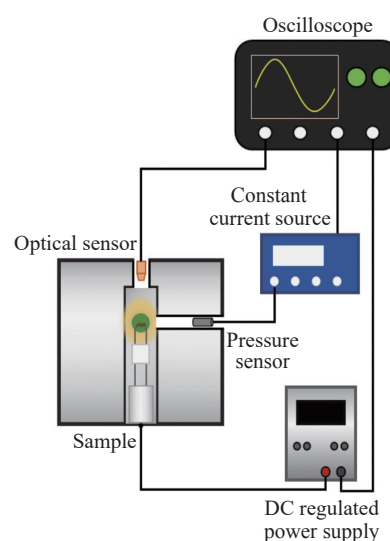


图 2 电点火头发火参数测试系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram for the experimental setup of the electric fusehead for testing the ignition parameters

固定模具内部开有贯穿通孔,用于固定测试样品、压力传感器和光信号传感器,同时确保样品通过压力信号孔与压力传感器间连通且与外界呈密封状态。

2.3 实验方案

将制备好的样品装入固定模具,使样品信号输出孔与固定模具压力信号输出孔对齐,将光电传感器固定在光信号输出孔内,电点火头发出的光信号透过有机玻璃由光电传感器测得,利用示波器采集电点火头发火过程中的通电信号、压力信号及光信号。进行点火电压为 5~60 V、步长为 5 V 的通电电压实验,2 组电源串联后进行点火电压为 60~90 V、步长为 10 V 的通电电压实验;根据实验结果,选取发火参数相对稳定的电压条件,利用高速相机观测桥丝及电点火头的发火历程,实验选取的通电电压为 30 V,拍摄频率设置为 $1 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。

3 结果与讨论

3.1 桥丝式电点火头发火历程分析

采用电点火头发火参数测试系统获得了不同电压下压力、光信号以及桥丝电压的变化曲线。选取点火电压为 5、20 和 60 V 时的典型测试曲线进行分析,如图 3 所示。

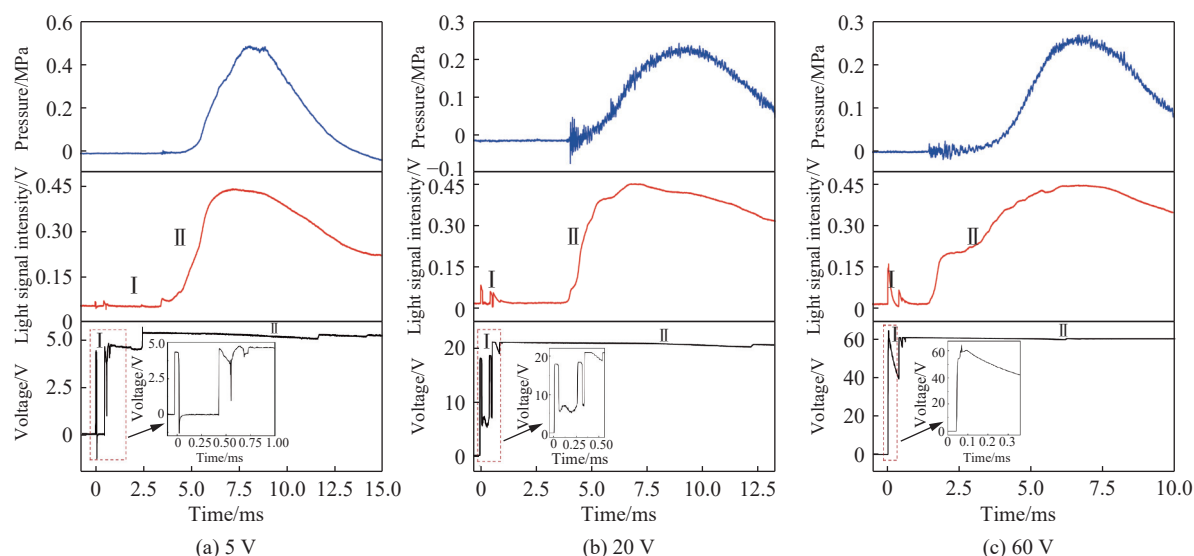


图 3 点火电压为 5、20 和 60 V 时电点火头的发火信号

Fig. 3 Ignition signals of the electric fusehead at 5, 20 and 60 V ignition voltages

点火电压为 5 V 时,桥丝电压变化曲线如图 3(a) 所示,从图 3(a) 可以看出,开关在闭合时电压产生弹性振荡,通过桥丝的分压在 4.3 V 恒定约 0.05 ms 后降为 0 V,经过约 0.31 ms 后再次接通,电压突跃至 4.6 V。期间由于开关断开时间极短,电压尚未降至初始值时,电路已经接通,回路中电动势在分压 4.6 V 有极小波动,呈下降趋势;持续 0.60 ms 后出现桥丝由固态变为液态的相变点,电阻发生突变,分压突跃上升,由于示波器存在测试误差,曲线峰值达到 5.6 V,此后桥丝为熔融状态,不断向周围药剂传热。随后电压急剧下降,2.41 ms 后电压呈一定斜率降低。11.58 ms 时刻桥丝熔断,电压曲线出现拐点,此后曲线为恒压源电压信号。分析压力和光信号曲线,3.41 ms 时压力和光信号几乎同时触发,此时电点火头药剂分解产生气体,压力升高,当药剂达到发火点后产生燃爆,7.22 ms 时光强达到峰值,7.94 ms 时气室压力达到最大。

点火电压为 20 V 时,如图 3(b) 所示,开关闭合过程中,桥丝通电电压在 18 V 维持 0.05 ms 后下降,由于桥丝电阻产生的压降,电压在 6 V 维持约 0.20 ms,此阶段桥丝呈熔融态,电路维持通路状态,电压未降至初始值。当开关再次接通后,桥丝经过 0.06 ms 的恒压供电,在 0.03 ms 后再次接通。极短的弹

性振荡使之持续 0.15 ms 后完全闭合,此阶段电压高于 20 V,在 0.54 ms 后呈一定斜率降低,此时曲线与 5 V 时类似。7.40 ms 时到达通电电压曲线拐点,此时桥丝完全气化。在 2.35 ms 时刻出现光信号和气体压力信号,桥丝相变产生的热量达到药剂发火点后,电点火头发火,其中桥丝气化过程中产生的高温高压压缩周围气相介质,形成一定的压缩波向周围扩散,在 4.06 ms 时光强达到峰值,5.48 ms 时压力达到峰值,电点火头药剂完全发火后,产生弱冲击波和不断扩散的热流。

点火电压为 60 V 时,如图 3(c) 所示,通过桥丝的初始电压在 60 V 左右,并出现突跃峰,开关振荡 0.06 ms 后,曲线与 5 V 时类似。此后桥丝与示波器之间的电压差减小,与 20 V 时曲线特征类似。经过约 0.35 ms 后开关闭合,电路电压相对稳定,在 0.65 ms 时刻电路完全接通,6.18 ms 时刻出现桥丝的相变点,由于点火电压较高,桥丝达到相变点的时间持续缩短。在 1.49 ms 时刻,电点火头发火,产生燃爆光信号和气体压力信号,并在 5.94 ms 时达到光强峰值,6.35 ms 时达到压力峰值。

综上分析,桥丝通电电压和光信号曲线分为 I、II 2 个阶段。第 I 阶段均由开关振荡产生,在开关闭合时产生弹性反弹,继而产生电磁感应效应,通电电压呈现几段反复振荡的波形,光电管接收到触发信号后产生几段突跃峰,此阶段波形呈不稳定的振荡波动,持续时间短。电压曲线的第 II 阶段为桥丝与电点火头药剂热效应的平衡阶段,此阶段桥丝为熔融状态,在电源供电产生能量的同时,通过热传导形式不断向周围包裹药剂传递能量,液态温度达到平衡。桥丝在通电过程中温度升高,电阻率增大,分压随之增大,在某时刻出现桥丝的相变点,随后桥丝断开。光信号曲线的第 II 阶段由桥丝和电点火头发火产生,光强达到峰值后缓慢减弱,而发火压力曲线具有相似的变化趋势,且压力峰滞后于光强峰。

3.2 点火电压对电点火头发火强度的影响

在有限空间内,电点火头发火强度能够反映火工品各序列的最佳匹配,前序列稳定的能量输出是保证电点火头发火可靠性和均一性的前提,而电点火头发火强度参数是下一序列传爆可靠性和输出威力大小的保证。对不同点火电压下的电点火头发火强度参数进行分析。

表 1 给出了电点火头在不同点火电压(U)下的发火参数,其中 t_i 为电点火头从接收恒压源稳定供电到桥丝相变点的时间, t_p 为电点火头发火压力峰值到达的时间, t_g 为电点火头发火光强峰值到达的时间, p_m 为发火压力峰值, V_g 为光信号峰值。

表 1 电点火头的发火参数
Table 1 Ignition parameters of the electric fusehead

U/V	t_i/ms	t_p/ms	t_g/ms	p_m/MPa	V_g/mV
5	9.174	4.526	3.814	0.483 4	437.42
10	7.069	2.456	2.565	0.395 9	517.20
15	8.173	3.360	1.770	0.343 4	518.11
20	6.863	3.134	1.708	0.231 4	452.72
25	7.410	4.350	3.180	0.267 2	448.40
30	6.486	3.820	2.220	0.255 2	465.64
35	6.803	2.626	2.335	0.265 5	426.15
40	5.930	3.820	2.278	0.243 4	436.16
45	5.540	3.554	2.970	0.236 8	415.59
50	5.239	3.537	2.800	0.237 2	437.26
55	5.682	4.446	3.721	0.226 9	424.99
60	5.530	4.860	4.454	0.256 2	439.03
70	5.781	4.801	3.954	0.243 0	430.81
80	5.700	4.207	3.334	0.253 2	434.82
90	5.626	4.745	3.911	0.250 8	430.33

对不同点火电压 U 下的电点火头发火时间数据进行分析, 获得如图 4 所示的 t_i-U 、 t_p-U 、 t_g-U 曲线。

由图 4 可知: 点火电压在 5~10 V 时, 电点火头的发火时间、发火压力峰值时间及发火光强峰值时间较长; 点火电压在 10~40 V 时, 电点火头桥丝的熔断时间呈下降趋势, 发火压力峰值时间及发火光强峰值时间在一定范围内波动; 点火电压高于 40 V 时, 电点火头的发火时间在 5.6 ms 左右趋于稳定, 而发火压力峰值时间及发火光强峰值时间在 3.0~5.0 ms 范围内有界波动。分析认为: 当电压较低时, 电点火头各发火时间曲线波动大; 随着点火电压升高, 电点火头的发火时间逐渐趋于稳定, 发火压力峰值时间及发火光强峰值时间波动幅度减小, 电点火头的发火时间差异变小, 发火一致性好, 发火精度高。

图 5 给出了电点火头的发火压力峰值和发火光强峰值随点火电压的变化曲线。从图 5 可以看出: 当点火电压低于 20 V 时, 发火压力峰值随电压升高而减小, 光信号峰值大幅波动; 当点火电压高于 20 V 时, 两者的峰值变化趋于稳定, 发火压力峰值维持在 0.25 MPa 左右, 发火光强峰值维持在 430 mV 左右。由此可见, 当点火电压较低时, 电点火头发火强度波动大, 会导致点火能量不均匀, 点火不稳定; 随着点火电压的升高, 电点火头发火强度波动变小, 点火能量趋于稳定, 能够可靠输出均匀的点火能量, 点燃下一序列装药。

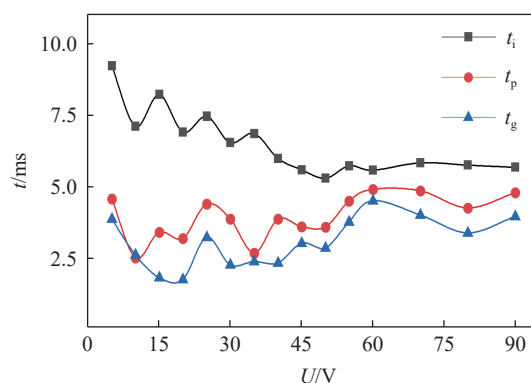


图 4 电点火头的发火时间参数随点火电压的变化关系

Fig. 4 Ignition time parameters of the electric fusehead changing with ignition voltage

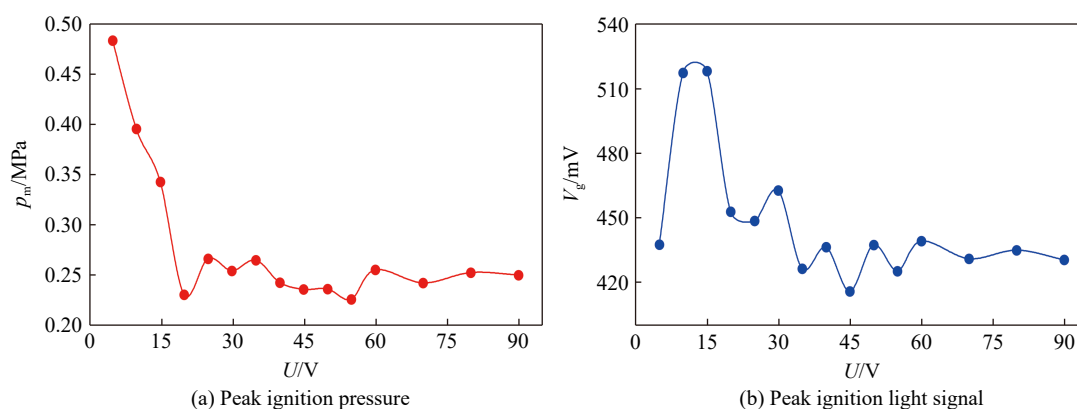


图 5 电点火头的发火压力峰值和发火光强峰值随点火电压的变化

Fig. 5 Peak ignition pressure and peak ignition light intensity of the electric fusehead changing with ignition voltage

根据电点火头发火理论分析: 低电压下, 桥丝按焦耳定律产生少量热能, 桥丝为熔融的固-液相共存状态, 增加了向电点火头药剂传递能量的时间, 电点火头发火时间也随之增加, 发火压力峰值和光强峰值大幅波动, 发火过程不稳定; 随着电压的升高, 恒压源输出的能量足以使桥丝发生固-液、固-气相变, 桥丝电阻增大, 产生的焦耳热增加, 与电点火头药剂之间的热传递效率提高, 发火特性参数趋于稳定; 随着电压不断升高, 汽化后的桥丝发生电离, 形成高温高压的等离子体^[15], 此阶段桥丝电阻显著增大, 直到发生电爆炸, 且随着电压的升高, 等离子体阶段持续时间越长, 前期能量消耗越少, 能量利用率越高, 桥丝与电点火头药剂的热传导越快, 总发火时间越短。

3.3 桥丝和电点火头发火状态

图 6 给出了 30 V 电压下桥丝和电点火头发火过程的高速摄影图像。从图 6(a) 可以看出, 通电后,

桥丝先升温至熔融状态, 0.34 ms 时出现微小光亮; 0.35 ms 时从某点处光强增加, 此时桥丝由液态转成气态; 0.38 ms 后桥丝光亮逐渐减小, 直到整个发火过程结束。与单个桥丝发火不同, 图 6(b) 中的电点火头在 0.06 ms 时, 电点火头内部药剂产生的气体少量溢出, 0.12 ms 时电点火头破裂成炽热碎片向周围飞散, 碎片上燃烧反应不断加剧, 从 3.00 ms 开始, 黏附在脚线端的药剂颗粒剧烈燃烧, 并在 3.40 ms 后继续持续一段时间。由此可知, 通电后, 桥丝接受瞬间的能量后升温, 继而完成电爆炸过程, 包覆在桥丝周围的薄层药剂发生化学反应, 不断产生气体并向周围释放热量, 当温度达到药剂发火点后, 电点火头破裂成碎片且碎片上的燃烧反应持续进行, 不断向下一序列传递能量, 提供可靠的点火能量。

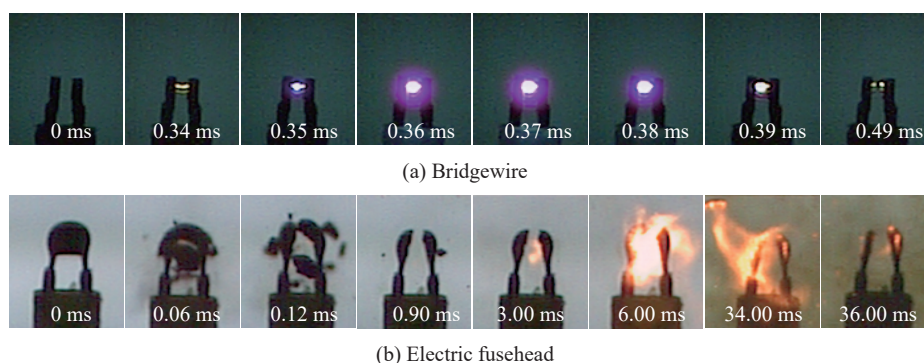


图 6 桥丝和电点火头发火过程的高速摄影图像

Fig. 6 High-speed photographic images of the firing process evolution of bridgewire and electric fusehead

综上分析可知, 电点火头通电后, 内部桥丝先完成固-液、固-气相态转变, 反应迅速, 持续时间短; 桥丝升温产生的热能不断向周围药剂传递, 使电点火头内部接触的药剂分解, 产生聚集的气体, 药剂发火破裂成炽热碎片; 此时, 能量的消耗不足以使桥丝快速熔断, 而是以熔融态黏连在脚线上, 桥丝电阻随温度升高不断增大, 继而完成向气态和等离子态的相态转变, 增加了电爆炸的时长。

3.4 桥丝式电点火头发火历程物理模型

根据桥丝式电点火头发火历程及发火的动态过程构建物理模型, 如图 7 所示。将电点火头在气室有限空间的发火历程简化为 4 个阶段: 图 7(a) 为桥丝升温加热药剂阶段, 通电后桥丝升温, 灼热的桥丝加热周围电点火头药剂, 药剂发生化学反应, 向周围释放热量并继续升温, 不断有热流产生; 图 7(b) 为药剂发火阶段, 当温度达到药剂发火点后, 电点火头发火并破裂成燃烧的炽热颗粒向周围飞散, 同时有弱冲击波产生, 电点火头药剂颗粒周围形成高温热流, 弱冲击波以电点火头发火点为中心形成球面波并在气室内传播; 图 7(c) 为热流扩散阶段, 待黏附在脚线上的药剂完全燃烧后, 高温热流继续向四周扩散, 冲击波迅速向气室壁面传播; 图 7(d) 为冲击波反射阶段, 冲击波经壁面反射及相互叠加后强度增加, 电点火头灼热的药剂颗粒及产生的热流持续在气室内剧烈扰动, 并不断进行能量传递, 直至发火结束。

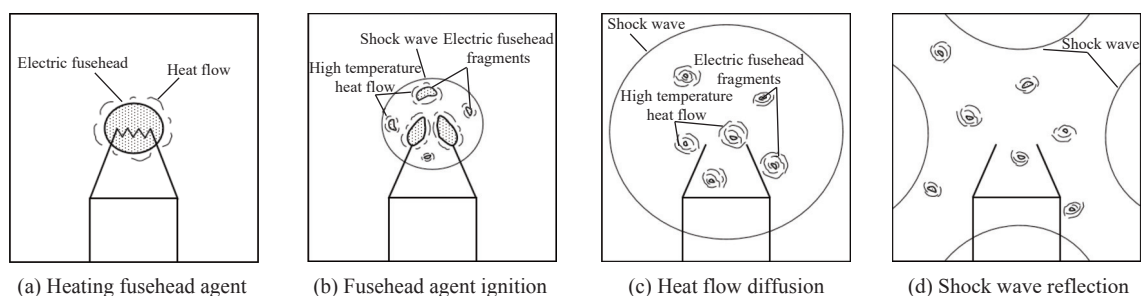


图 7 桥丝式电点火头发火历程物理模型

Fig. 7 Physical modelling of the firing process evolution of bridgewire electric fusehead

4 结 论

本研究深入探讨了有限空间内桥丝式电点火头的发火机制,获得了发火历程变化规律、发火强度影响机理及发火动态过程的物理模型,得到以下主要结论。

(1) 桥丝式电点火头发火历程主要包括短暂的通电稳定期和桥丝相变阶段,相变阶段为桥丝与电点火头药剂热效应的平衡阶段,在某时刻出现桥丝的相变点,完成向气态和等离子态的相态转变,桥丝断开。

(2) 向桥丝通电,发火电压达到某一定值后,桥丝产生的焦耳热大大提高了桥丝与电点火头药剂间的热传递效率,发火精度提高,点火能量趋于稳定,能够可靠地输出均匀的点火能量。

(3) 在气室有限空间内,电点火头发火动态过程可描述为桥丝升温加热药剂、药剂发火、热流扩散和冲击波反射4个阶段。桥丝通电升温加热电点火头药剂后,在分解气体压力的作用下,电点火头破裂成燃烧的炽热颗粒向周围飞散,同时产生高温热流和冲击波,高温热流不断向四周扩散,冲击波经壁面反射后强度会增加,气室内压力增大,炽热颗粒和高温热流不断向下一序列进行能量传递,提供可靠的点火能量。

参考文献:

- [1] 成一,陈守文.电点火头发火过程的时间结构的研究[J].爆破器材,2001,30(5):22-24.
CHENG Y, CHEN S W. Study on the time structure of electric ignition process in fuse head [J]. Explosive Materials, 2001, 30(5): 22-24.
- [2] 王鹏,杜志明.桥丝式电火工品热点火理论[J].火工品,2007(4):26-30.
WANG P, DU Z M. Thermal ignition theory of electric hot wire initiating devices [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2007(4): 26-30.
- [3] 高文乐,周奥博,朱常胜,等.电流对灼热桥丝式电雷管点火头发火时间的影响[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.
- [4] 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, et al. Ignition time variation of hot bridge-wire electric fusehead [J]. Explosive Materials, 2022, 51(6): 27-31.
- [5] LEE A E, DRAKE C R, RICHARDSON J. A view on the functioning mechanism of EBW detonators—part 1: electrical characterisation [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(19): 192008.
- [6] LEE A E, DRAKE C R, RICHARDSON J. A view on the functioning mechanism of EBW detonators—part 2: bridgewire output [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(5): 052024.
- [7] LEE A E, DRAKE C R, RICHARDSON J. A view on the functioning mechanism of EBW detonators—part 3: explosive initiation characterisation [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(18): 182023.
- [8] SMILOWITZ L, HENSON B F, REMELIUS D, et al. Experimental observations of exploding bridgewire detonator function [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(21): 215901.
- [9] VALANCIUS C J, GARASI C J, O'MALLEY P D. Power and energy of exploding wires [J]. AIP Conference Proceedings, 2017, 1793(1): 040040.
- [10] 李涛,傅华,谭多望,等.金属桥丝电爆炸及飞片驱动过程的计算[J].爆炸与冲击,2010,30(1):70-74.
LI T, FU H, TAN D W, et al. Calculation of metal bridge foil electric explosion and flying blade driving process [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(1): 70-74.
- [11] 王窈,孙秀娟,郭菲,等. Al/Ni 爆炸箔电爆特性及驱动飞片能力研究[J].火工品,2016(3):5-8.
WANG Y, SUN X J, GUO F, et al. Study on electrical characteristic and flyer driven ability of Al/Ni exploding foil [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2016(3): 5-8.

- [12] ZENG Q X, et al. Mechanism and characteristics on the electric explosion of Al/Ni reactive multilayer foils [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(9): 93–102.
- [13] 赵丽君, 易涛, 朱宏娜, 等. 桥丝电爆炸过程中的电磁脉冲效应 [J]. *含能材料*, 2019, 27(6): 481–486.
ZHAO L J, YI T, ZHU H N, et al. Electromagnetic pulse effect during the bridge wire electric explosion [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2019, 27(6): 481–486.
- [14] 王伯义, 冯增国, 杨荣杰. 火药燃烧理论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
WANG B X, FENG Z G, YANG R J. The theory of gunpowder combustion [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997.
- [15] 李志鹏, 张攀军, 吕子剑, 等. 爆炸桥丝火工品的高压静电放电响应 [J]. *含能材料*, 2015, 23(6): 578–582.
LI Z P, ZHANG P J, LYU Z J, et al. Response to high voltage electrostatic discharge for exploding bridgewire detonators [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2015, 23(6): 578–582.

Ignition Characteristic of Bridgewire Electric Ignition Element in Limited Space

HAN Tifei, JIANG Xin, ZHU Yanyu, WANG Meng, LIU Sai, CHEN Kaiqiang, HOU Bowen

(School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China)

Abstract: As a common ignition element, the ignition characteristic in limited space of a bridgewire electric ignition element (EIE) is the internal embodiment of its precision and reliability as an explosion-transfer sequence. The limited space environment of bridgewire electric fusehead ignition is simulated by preparing test samples and the test system of the ignition parameter is designed to test the time structure of the ignition process, the gas pressure, ignition light intensity and other parameters in limited space; using the high-speed camera to test the dynamic ignition process of the EIE, a physical model of ignition in the limited space of EIE is established. The research shows that with the increase of the ignition voltage, the phase transition time of the bridgewire is shortened, the duration of the plasma stage increases, and then tends to stabilize. The ignition time of the electric fusehead fluctuates at about 5.6 ms, and the ignition pressure time and the ignition light intensity time are maintained in the 3.0–5.0 ms range. After the ignition voltage reaches 20 V, the ignition characteristic parameters tend to be stable, and it can reliably output uniform ignition energy for igniting the next sequence of charging. In the limited space of the air chamber, the dynamic process of EIE can be divided into four stages: bridgewire heating up and heating fusehead agent, fusehead agent ignition, heat flow diffusion and shock wave reflection.

Keywords: limited space; electric ignition element; ignition pressure; ignition voltage