

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.06.003

# 类石墨桥膜的发火可靠性研究\*

李东奇 沈李啸 陈岱松 朱顺官  
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

**[摘要]** 以相同工艺制作类石墨桥膜点火桥,对其进行蘸药等处理,形成点火头结构;升降法试验得到不同激发条件下50%发火时的电流或电压,并验证其发火可靠性;测试点火头的响应状态,得到裸桥状态下类石墨桥膜对不同能量输入的响应。以相同方式制作桥丝式点火头,得到发火参数与电压、电流特性。涂覆有150目下叠氮胍镍(NHA)的类石墨桥膜,99%恒流发火电流为325.65 mA;99%恒压发火电压为2.43 V;在电容47  $\mu$ F条件下99%脉冲发火电压为10.45 V。同样蘸药的桥丝式点火头,99%恒流发火电流为89.61 mA;在电容47  $\mu$ F条件下99%脉冲发火电压为4.72 V。对比发现,类石墨桥膜点火头在使用钝感药剂时可满足0.99(0.90置信度下)可靠性要求。  
**[关键词]** 换能元;类石墨桥膜;叠氮胍镍(NHA);发火特性;可靠性研究  
**[分类号]** TJ450.5

## Study on Firing Reliability of Graphite-Like Film Ignition Bridge

LI Dongqi, SHEN Lixiao, CHEN Daisong, ZHU Shunguan

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

**[ABSTRACT]** Graphite-like film ignition bridges made by the same manufacturing process were treated with dipping and other treatments to form the ignition head structure. Lifting method was used to obtain the 50% ignition current or voltage under different excitation conditions, and to verify the ignition reliability. Response state of the bare bridge ignition head was tested to obtain the different response performance under the different energy input between the graphite-like membrane bridge and the bridge wire. The bridge wire ignition head made by the same manufacturing process was also tested under the same dipping conditions. Its ignition parameters, current and voltage characteristics were also obtained. For graphite-like bridge membrane coated with NHA under 150 mesh, it has a 99% constant ignition current of 325.65 mA, a 99% constant ignition voltage of 2.43 V, and a 99% pulse ignition voltage of 10.45 V under 47  $\mu$ F. The bridge wire ignition head treated with same dipping has a 99% constant ignition current of 89.61 mA, and a 99% pulse ignition voltage of 4.72 V under 47  $\mu$ F. Comparison shows that, with the application of insensitive chemicals, graphite-like bridge membrane ignition heads can achieve a reliability of not less than 0.99 (under 0.90 confidence) in practical use.

**[KEYWORDS]** energy charger; graphite-like film ignition bridge; azide nickel (NHA); ignition characteristics; firing reliability study

## 引言

碳材料具有高化学稳定性和大电阻特性,同时受电压和频率的影响较小,是一种优异的换能元材料<sup>[1]</sup>。早在20世纪60年代,国外已经尝试采用石墨材料加黏合剂的导电剂配方,将其涂覆于两个电极之间,通电后发热,进而点燃含能药剂。相比之

下,我国的涂膜技术相对落后,形成的石墨膜阻值高且极差很大,需要的点火电压高达几百伏,另外,石墨膜对感应电、杂散电、静电等较为敏感;因而始终未能得到实际应用。

David等<sup>[2]</sup>介绍了碳膜电阻构成的点火器,强调碳膜桥的可靠性可达到100%,并对于桥-药界面的要求不高,普适性强。类似的美国专利也介绍了同样的碳膜电阻点火桥技术<sup>[3]</sup>。

\* 收稿日期:2020-02-18

科研项目:南京理工大学本科科研训练“百千万”计划;2018年国家级项目“类石墨桥膜发火可靠性研究”

第一作者:李东奇(1997-),男,本科生,主要从事特种能源技术与工程研究。E-mail:781717911@qq.com

通信作者:朱顺官(1962-),男,硕士,研究员,主要从事火工药剂技术研究。E-mail:zhusg@njust.edu.cn

电火工品换能元按照作用方式分为两种:微对流形式和热传导形式<sup>[4-5]</sup>。作为微对流形式的一种,半导体桥(SCB)被广泛研究<sup>[6]</sup>。刘明芳等<sup>[7]</sup>对半导体桥进行了输入能量分布研究,成功构建了桥体升温模型,得到了半导体桥的升温特性。马鹏等<sup>[8]</sup>则研究了两种不同粒度的叠氮化铅(LA)对SCB发火性能的影响。2015年,学者们对碳晶膜电点火桥进行了发火特性研究,主要探究了点火桥的发火性能受碳晶填量与脚线极距的影响,并且对桥膜上5种药剂的发火感度进行了探究。由于类石墨桥膜是一种电激发热换能元,因此,试验同时探究了温度对其阻值和发火性能的影响<sup>[9]</sup>。

如今,通过精密的切割成型技术,可将 $1\ \Omega$ 以下初始类石墨膜电阻加工,得到 $7\sim 12\ \Omega$ 成型点火桥。相关研究表明,该点火桥具有低能恒流与电容脉冲发火特性,环境适应性好,尤其是在低温下发火感度有所提升,拥有其他换能元所不及的性能<sup>[10]</sup>。

本文中,对类石墨桥膜配合叠氮胍镍(NHA)作用的情况进行了相关试验,主要包括测试恒流、恒压、脉冲发火条件下的相关电流、电压参数,并验证其可靠性。同时也对桥丝式火工品电压、电流特性进行表征,并与类石墨桥膜相应特性进行对比。

## 1 试验

### 1.1 类石墨桥膜点火头制作

以成熟的合成工艺制备出NHA,烘干后进行安全筛分<sup>[11]</sup>。分别获得150目下和300目下的产品。

配制8%(质量分数)的聚乙烯醇胶液,聚乙烯醇分子量 $1\ 750\pm 50$ 。即在92 g的热纯水中加入8 g聚乙烯醇固体颗粒,完全溶解后备用。

对 $9.5\sim 10.5\ \Omega$ 类石墨桥进行弯折,注意控制膜区的方向尽量一致。图1为类石墨桥膜裸桥弯折示意图。将NHA与胶液依照比例配置成药头料液,进行人工蘸药与烘干,形成点火头结构。

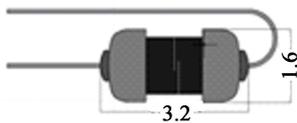


图1 类石墨桥膜点火头弯折示意图(单位:mm)

Fig.1 Bending diagram of graphite-like film ignition bridge(unit:mm)

### 1.2 试验装置与试验方法

方案 I:使用150目下的NHA,按药胶质量比

1.0:1.2的投料方式调配药头浆料,至合适的黏稠度后即可开始蘸药,做到一遍蘸成,并晾干,最后在 $(60\pm 2)\ ^\circ\text{C}$ 下烘6 h以上。实测药头的平均质量为 $(8.5\pm 1.0)\ \text{mg}$ 。

方案 II:使用150目下NHA与300目下NHA双层蘸药的方式。内层使用300目下NHA,按药胶质量比1.0:0.6进行投料蘸药,晾干,在 $(60\pm 2)\ ^\circ\text{C}$ 下烘6 h以上;外层使用150目下NHA,按药胶质量比1.0:1.2投料蘸药,晾干,在 $(60\pm 2)\ ^\circ\text{C}$ 下烘6 h以上。实测药头的平均质量为 $(9.5\pm 1.5)\ \text{mg}$ 。

试验仪器:DC9801智能雷管电参数测试仪,南京理工大学民用爆破器材研究所;E3633A直流电源、储能放电起爆仪,安徽电科技股份有限公司。

对制备合格的点火头分别进行安全电流测试,恒流、恒压发火与脉冲发火试验,可靠性验证试验,以及高低温试验。发火可靠性试验根据GJB376—1987进行。50%发火的电流及电压测试均根据GJB5309 10—2004升降法试验进行。高低温试验根据《电雷管通用规范》进行,因试验室条件所限,低温箱最低温度只能达到 $-50\ ^\circ\text{C}$ ,同时补充了桥丝式点火头在相同条件下的部分试验作为对照。

## 2 结果与分析

### 2.1 类石墨桥膜对不同输入能的响应特性

在暗室中,电容为 $47\ \mu\text{F}$ 条件下,分别对电阻符合要求的未蘸药的类石墨桥膜进行脉冲发火与恒流发火试验,采用相机记录桥膜通电全过程。以桥膜通电作为计时起点,以初次观测到桥膜发火现象作为发火点,对发火点后连续5 ms时间间隔进行两次观测。脉冲发火点和恒流发火点后连续图像如图2和图3所示。分析可知,点火头响应方式存在差异。脉冲发火为产生火星的电爆过程,非常迅速。恒流发火则是由相对较长时间热量积累而导致的电热过程。恒压发火过程在性质上与恒流发火过程类似,因此不再单独试验。从图2、图3中也可以得出,脉冲发火能量持续作用时间相较于恒流发火更短,为激发点火头所需要提供的能量更高,因此从使用可靠性方面考虑,应选择恒流或是恒压作用作为激发手段。

### 2.2 恒压发火试验

#### 2.2.1 升降法试验

对通过方案 I 处理后一致性良好的点火头,利

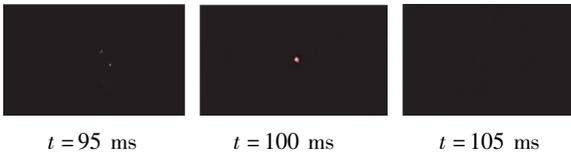


图2 脉冲发火点后的图像

Fig.2 Image after pulse ignition point

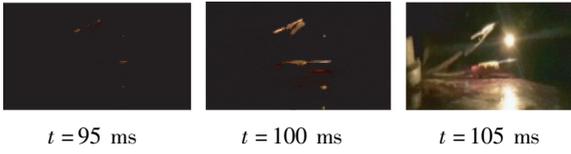


图3 恒流发火点后的图像

Fig.3 Image after constant current ignition point

用高频恒压源进行点火,取步长为0.1 V,对其发火电压进行考察。方案I中类石墨桥膜恒压发火性能测试数据及标准偏差列于表1。

表1 类石墨桥膜恒压发火性能

Tab.1 Ignition performance at constant voltage of graphite-like film ignition bridge

方案	$U_{0.01}$	$U_{0.50}$	$U_{0.99}$	$\sigma$
I	1.63	2.03	2.43	0.17

表1中, $U_{0.01}$ 代表点火头在该测试条件下的1%发火的电压; $U_{0.50}$ 代表50%发火的电压; $U_{0.99}$ 代表99%发火的电压。

### 2.2.2 可靠性试验

由2.2.1得到99%发火电压后,在2.5 V恒压条件下点火230发,全部发火。

依据GJB376—1987《火工品可靠性评估方法》,可得出该火工品达到了技术要求(0.90置信度下)的可靠性水平。

## 2.3 恒流发火试验

### 2.3.1 升降法试验

设定电能作用时间为8 ms,取步长10 mA,分别对使用方案I、方案II蘸药的点火头按升降法进行序贯试验,得到50%的发火电流及标准偏差。两种方案中类石墨桥膜恒流发火性能列于表2。

表2中, $I_{0.01}$ 代表点火头在该测试条件下的1%发火的电流; $I_{0.50}$ 代表50%发火的电流; $I_{0.99}$ 代表99%发火的电流。

从表2的数据可以得出,依照方案II进行两次蘸药后得到的点火头,其恒流发火感度高于方案I。考虑到方案II使用300目NHA进行蘸药时胶量减半,两方案蘸药层数粒度分布等条件不同,无法准确说明目数与感度间的关系。因此,选择双层蘸药时

表2 类石墨桥膜恒流发火性能  
Tab.2 Ignition performance at constant current of graphite-like film ignition bridge

方案	$I_{0.01}$	$I_{0.50}$	$I_{0.99}$	$\sigma$
I	198.89	262.27	325.65	27.25
II	161.97	215.67	269.37	23.09

改变药剂比,其目的是维持点火头的强度。在此基础上,试验数据表明对感度的提高也有一定帮助,说明这是另一可行的研究方向。

### 2.3.2 安全电流测试

设定电流持续作用时间300 s,对方案I和方案II的两组药头分别进行安全电流测试。

方案I:160 mA。连续50发未发火且点火头在2.5 V下恒压点火均发火,故得以验证。

方案II:158 mA。连续50发未发火且点火头在2.5 V下恒压点火均发火,故得以验证。

## 2.4 脉冲放电发火试验

### 2.4.1 升降法试验

对使用方案I的药头,按照升降法试验得到电容为47  $\mu\text{F}$ 条件下的脉冲发火电压与标准偏差。方案I类石墨桥膜脉冲发火性能列于表3。

表3 电容为47  $\mu\text{F}$ 条件下类石墨桥膜脉冲发火性能

Tab.3 Pulse ignition performance of graphite-like film ignition bridge at 47  $\mu\text{F}$

方案	$U_{0.01}$	$U_{0.50}$	$U_{0.99}$	$\sigma$
I	6.80	8.63	10.45	0.78

对使用方案II的药头,按升降法试验来得到电容为28  $\mu\text{F}$ 和47  $\mu\text{F}$ 条件下50%脉冲发火电压和标准偏差。方案II类石墨桥膜脉冲发火性能如表4所示。

表4 电容为47  $\mu\text{F}$ 与28  $\mu\text{F}$ 条件下类石墨桥膜脉冲发火性能

Tab.4 Pulse ignition performance of graphite-like film ignition bridge at 47  $\mu\text{F}$  and 28  $\mu\text{F}$

方案	电容/ $\mu\text{F}$	$U_{0.01}$	$U_{0.50}$	$U_{0.99}$	$\sigma$
II	47	4.79	6.65	8.51	0.80
II	28	5.53	7.37	9.21	0.79

选取表2中方案I的50%发火电流与表3中50%脉冲发火电压进行发火能量的计算。根据公式

$E = 1/2 CU^2$ , 得到 50% 脉冲发火能量为 1 750. 20 mJ; 又根据公式  $E = I^2R$ , 取点火头平均电阻  $R = 10 \Omega$ , 得到 50% 恒流发火能量为 687. 85 mJ。分析得到, 在同样激发点火头的情况下, 恒流发火方式所需提供的能量更小, 即发火可靠性更好。这一结论也符合裸桥响应试验中的结果。

### 2.4.2 可靠性试验

对方案 I 的药头, 在电容 28  $\mu\text{F}$ 、电压 14 V 条件下进行脉冲点火, 共计 230 发, 有 2 发未发火。经观测, 桥膜位置无误, 电阻正常, 且提高电压后仍未发火; 推测药剂颗粒可能过大, 颗粒间隙胶水过多导致药头钝感, 故改用更细的 300 目下 NHA 试验。

方案 II 试验: 使用 300 目下 NHA 与 150 目下 NHA 双层蘸药, 在电容 28  $\mu\text{F}$ 、电压 14 V 条件下, 对 230 发点火头进行试验, 全部发火; 设定电压降为 12 V, 进行 230 发可靠性试验, 仍全部发火。

依据 GJB376—1987《火工品可靠性评估方法》, 可得出该火工品达到了技术要求(0.90 置信度下)的可靠性水平。

### 2.5 高低温试验

选取 50 发方案 I 蘸药点火头置入烘箱 60  $^{\circ}\text{C}$  加热 2 h, 在电容 47  $\mu\text{F}$ 、电压 12 V 条件下进行脉冲发火测试, 均发火。

选取 50 发方案 I 蘸药点火头置入低温箱 -50  $^{\circ}\text{C}$  降温 2 h, 在电容 47  $\mu\text{F}$ 、电压 12 V 条件下脉冲发火测试, 均发火。

由此, 可认为高低温对类石墨桥膜的脉冲发火性能没有影响。参考裸桥响应试验, 原因可能为类石墨桥膜在脉冲发火时, 发火机理为产生电火花进而使药剂发火, 因而受外界环境温度影响较小。

### 2.6 桥丝式点火头对照试验

#### 2.6.1 升降法试验

对 7~12  $\Omega$  的桥丝式点火桥进行相同的方案 I 蘸药处理, 使用 150 目下 NHA 按药胶质量比 1.0 : 1.2 的投料方式调配药头浆料, 至合适的黏稠度后开始蘸药, 一遍蘸成, 并晾干, 接着在  $(60 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  下烘 6 h 以上, 最后进行 8 ms 恒流发火升降法试验与脉冲发火升降法试验(电容 47  $\mu\text{F}$ )。试验数据列于表 5。

表 5 中,  $x_{0.01}$  为点火头在对应测试条件下 1% 发火时分别所需要的电流与电压;  $x_{0.50}$  为 50% 发火时分别所需要的电流与电压;  $x_{0.99}$  为 99% 发火时分别所需要的电流与电压。

从表 2、表 3、表 5 的数据得出, 类石墨桥膜点火头 50% 发火电流和电压均远高于桥丝式点火头 50%

表 5 桥丝式点火头恒流与脉冲发火性能(电容 47  $\mu\text{F}$ )

Tab. 5 Current constant and pulse firing performance of bridge wire ignition head at 47  $\mu\text{F}$

参数	$x_{0.01}$	$x_{0.50}$	$x_{0.99}$	$\sigma$
恒流发火/mA	86.05	87.83	89.61	0.77
脉冲发火/V	3.90	4.31	4.72	0.18

发火电流和电压, 因此前者受杂散电、静电等外在影响小, 需要更高的激发能量, 具有更优良的安全性。同时, 前者发火区间更大, 具有更好的发火可靠性。

#### 2.6.2 电流电压特性试验

在相同蘸药(方案 I)情况下观察两种点火头发火时电流和电压特性曲线, 电容放电电压依次选取 10、15、20、25 V, 进行升压试验。图 4 和图 5 分别为电容发火下类石墨桥膜与桥丝式点火头电压、电流特性变化曲线。

在电容开始放电时, 类石墨桥膜点火头电压、电流均出现跃迁, 随后为连续稳定的下降曲线, 最终趋于恒值(原值); 随着放电电压上升, 电容放电累计作用时间变化不大, 但对曲线面积积分后得出总能量提升较明显。在电容开始放电时, 桥丝式点火头电压、电流也均有跃迁, 一定作用时间后桥丝被打断, 电压、电流线再次发生跃迁, 之后为水平恒值; 随着电容放电电压升高, 桥丝被打断所需时间缩短, 不利于能量的积累与利用, 点火头瞎火概率提高。

两者对照比较可知, 两种点火头发火时的电流、电压均随放电电压的升高而升高。虽然两种点火头对于激发的响应幅度比较接近, 但相较于桥丝式点火头, 类石墨桥膜点火头对于能量激发的响应持续

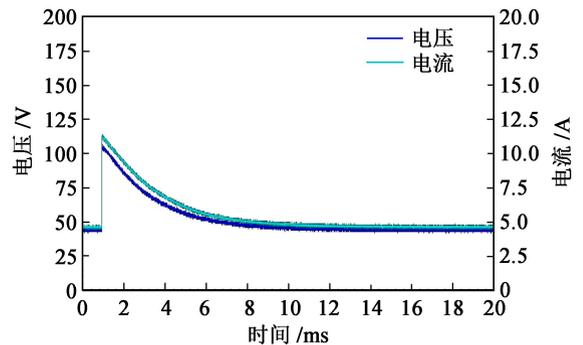


图 4 电容发火下类石墨桥膜点火头电压与电流特性变化

Fig. 4 Variation of voltage and current characteristics of graphite-like film ignition bridge igniter under capacitor ignition

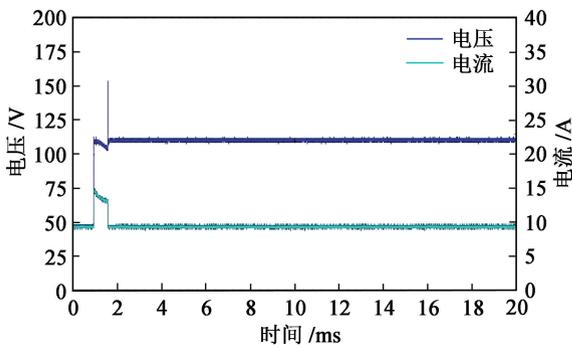


图5 电容发火下桥丝式点火头电压与电流特性变化

Fig.5 Variation of voltage and current characteristics of bridge wire ignition head under capacitor ignition

时间更长,能量利用更好,从而有更优良的热积累,进而有利于发火。在使用钝感药剂的趋势下,缺少基底材料从而容易在发火过程中断开的桥丝式火工品,较难满足工业上的实际应用。相比之下,类石墨桥膜火工品具有更好的发展前景。

### 3 结论

对类石墨桥膜发火可靠性进行了探究。对于  $9.5 \sim 10.5 \Omega$ 、使用 150 目下 NHA 蘸药的类石墨桥膜点火头的研究结果如下:

1) 恒流发火条件下,99% 发火电流为 325.65 mA,1% 发火电流为 198.89 mA。

2) 恒压发火条件下,99% 发火电压为 2.43 V,1% 发火电压为 1.63 V。

3) 在电容  $47 \mu\text{F}$  放电条件下,99% 发火电压为 10.45 V,1% 发火电压为 6.80 V。

4) 若改用 300 目下的 NHA 进行双层蘸药,则点火头在维持强度的同时,能在各项试验中具有比 150 目下 NHA 更高的感度。

5) 类石墨桥膜点火头相较于桥丝式点火头,需要更高的激发能量,具有更宽的发火范围,在实际应用中具有更好的安全性。该结果也表明,蘸有 NHA 的类石墨桥膜点火头性能较经过相同条件处理的桥丝式点火头更优良。由此表明,类石墨桥膜点火头拥有优良的低能恒流和电容脉冲发火特性,并在常规和使用状态中,能达到 0.90 置信度下 99% 发火的技术条件要求。

### 参考文献

[1] POLISTCHOOK V P, SAMOYLOV I S, AMIROV R Kh, et al. Arc ignition at heating of graphite by fixed

current[J]. Journal of Physics: Conference Serice, 2017 (927):012042.

[2] DAVID A R, DARREN M W, STEVEN F S, et al. CuO/Al thermites for solid rocket motor ignition[J]. Journal of Propulsion and Power, 2013, 29(5):1194-1199.

[3] PHILIP N M. Electric actuated explosion detonator: US 6 497 180 [P]. 2002-12-24.

[4] 朱顺官,张琳,李燕,等. 碳晶膜电点火桥特性研究[J]. 火工品,2015(3):1-4.

ZHU S G, ZHANG L, LI Y, et al. Study on the igniter with carbon crystal bridge-film[J]. Initiators and Pyrotechnics,2015(3):1-4.

[5] RAMACHANDRAN R. Reaction tuning of selectively deposited nano-thermite inks for thrust and heat deposition [D]. West Lafayette, IN,US, Purdue University,2016.

[6] 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 and Pyrotechnics,2018(1):11-14.

[7] 刘明芳,张小兵. 半导体桥火工品升温特性研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版),2010,34(2):203-206,212.

LIU M F, ZHANG X B. Temperature rising characteristic of bridge in semiconductor bridge [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2010,34(2):203-206,212.

[8] 马鹏,朱顺官,张琳,等. 叠氮胍镍半导体桥点火研究[J]. 含能材料,2010,18(2):213-216.

MA P, ZHU S G, ZHANG L, et al. Ignition of semiconductor bridge with nickel hydrazine azide [J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2010,18(2):213-216.

[9] 高滕,朱顺官,唐祥斌,等. 碳晶电点火桥技术研究[C]//2014年(第六届)含能材料与钝感弹药技术学术研讨会论文集. 成都,2014:221-224.

GAO M, ZHU S G, TANG X B, et al. Initiation technique of carbon crystal electric ignition bridge[C]//Proceedings of the 6th Symposium on Energy-containing Materials and Insensitive Ammunition Technology, 2014. Chengdu, 2014:221-224.

[10] 张英豪,张立明,姚升武,等. 电子雷管发火桥头沾药盘:CN108344337A[P]. 2018-07-31.

[11] 朱顺官,徐大伟,曹仕瑾,等. 高威力配合物起爆药:叠氮胍镍[J]. 爆破器材,2005,34(5):17-19.

ZHU S G, XU D W, CAO S J, et al. A high powerful primary explosive:nickel hydrazine azide[J]. Explosive Materials,2005,34(5):17-19.