

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.04.004

SY 药柱轴向等离子体起爆下的爆轰特性^{*}

余新乐 朱顺官 李 燕 张 琳
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 为了得到乙二胺·三乙烯二胺·高氯酸盐(SY)在电爆作用下的爆轰特性,以镍-铬(Ni-Cr)丝、铝(Al)丝和钨(W)丝作为等离子体源,进行了SY的等离子体起爆特性研究。在改变炸药密度、炸药粒度和添加组分进行包覆等条件下,得到相对应的起爆阈值;通过比较阈值大小以判断起爆难易程度。结果表明:炸药粒度较小或装药密度较大时,更容易起爆。等离子体起爆SY药柱时,SY粒度与装药密度相比,粒度大小对起爆难易的影响作用更大。当装药密度大、炸药粒度小时,由氟橡胶包覆的SY相对容易起爆。SY药柱对这几种金属桥丝等离子体敏感度由大到小的顺序为:Ni-Cr丝、W丝、Al丝。另外,药柱的中心孔径较小时更容易被起爆。

[关键词] 等离子体;桥丝;起爆;粒度

[分类号] TQ560.7

Detonation Characteristics of SY Columns under the Axial Initiation of Plasma

YU Xinle, ZHU Shunguan, LI Yan, ZHANG Lin
School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] To study the detonation properties of SY under initiation of electric explosion, explosive bridge wires made by Ni-Cr, Al or W were used as energy conversion component to detonate SY columns. Different density, particle size, and addition of components of SY columns were tested to obtain corresponding thresholds of initiation voltage. The results show that larger density or smaller particle size is conducive to detonate. Comparing to density and particle size, the latter has a greater impact on the degree of difficulty. Under the conditions of large density and small particle, SY columns coated with fluororubber are the easiest to detonate by plasma. SY is more sensitive to the Ni-Cr plasma than to W plasma or Al plasma. In addition, small pores of the pillars are more likely to be detonated.

[KEYWORDS] plasma; bridge wire; detonation; particle size

引言

桥丝式火工品性能稳定,易于控制,可作为一种点火装置被广泛使用。随着武器弹药使用电磁环境的日益复杂化,在空中运输过程中可能会受到来自运载工具高压静电感应的威胁^[1]。其中,爆炸桥丝式火工品相对于热桥丝式火工品具有更强的抗静电性和抗频射性;同时,爆炸桥丝式火工品起爆更快,桥丝在高电压、强电流作用下,会在很短的时间内熔化、汽化,形成等离子体,以冲击波方式起爆炸药;另外,爆炸桥丝式火工品可作为启动电磁脉冲发生器

的能量源^[2]。

对等离子体起爆炸药的研究比较早,在国内研究中,潘邦金^[3]使用金丝作为等离子体源起爆了多种炸药,试验得到等离子体起爆猛炸药时,炸药的种类、晶形及颗粒尺寸对起爆难易有较大的影响。钟敏等^[4]对爆炸桥丝式火工品的高压静电放电响应进行了研究,始发装药为低密度的太恩(PETN),分别对火工品进行脚-脚和脚-壳的静电放电刺激,测得桥丝虽然发生了爆炸,但未引起火工品发火。薛乐星等^[5]以镍-铬(Ni-Cr)丝和钨(W)丝作为等离子体源对低密度炸药进行起爆,得到结论,密度小、粒径小的炸药更容易被等离子体起爆,在等离子体源

^{*} 收稿日期:2018-01-22
作者简介:余新乐(1994-),男,硕士研究生。主要从事火工技术应用研究。E-mail:502096793@qq.com
通信作者:朱顺官(1962-),男,研究员,主要从事火工药剂技术和新型爆破器材研究。E-mail:zhushg@mail.njust.edu.cn

和炸药状态相同时,对等离子体的感度由大到小的顺序为 HMX、LLM-105、FOX-12、TATB, FOX-7 与 LLM-105 感度相当。马鹏等^[6]以半导体桥作为等离子体源起爆 4 种起爆药,感度顺序从大到小为:苦味酸铅、叠氮化铅、斯蒂芬酸铅、硝酸胍镍。

国外的学者对等离子体起爆技术有着较多的机理研究。Park 等^[7]对比单晶硅 (SCB) 半导体桥与多晶硅半导体桥,测试了它们的等离子体密度、电子密度等参数,结果显示,单晶硅的等离子体峰值相对于多晶硅的来说,出现得更早,他们对数据进行了有限元分析,认为出现该现象的原因是单晶硅具有更好的导电性,更容易断裂。Lee 课题组^[8-9]基于爆炸桥丝起爆 PENT 试验,对爆炸桥丝起爆机理作了系统性研究,将起爆过程分为 3 个步骤进行了表征:桥丝能量的输入、桥丝能量的输出、桥丝等离子体与炸药的相互作用。

等离子体起爆高能炸药作为一种新兴的无起爆药起爆技术,对于不敏感的武器系统的发展具有重要意义,在电磁脉冲武器中也起着极其重要的作用。在等离子体起爆炸药过程中,炸药存在燃烧转爆轰的临界情况,而影响桥丝起爆炸药临界条件的因素有很多。由于国内对桥丝起爆较高密度的炸药研究较少,本文中,设计试验研究了炸药密度、粒度、桥丝种类及尺寸等因素对等离子体起爆炸药燃烧转爆轰的影响,同时测试了该起爆方式下密度对炸药爆速的影响,从而得到了桥丝起爆较高密度乙二胺·三乙烯二胺·高氟酸盐 (SY) 药柱的爆轰特性。在改变一些条件时,可大大降低其起爆电压的阈值。

1 试验部分

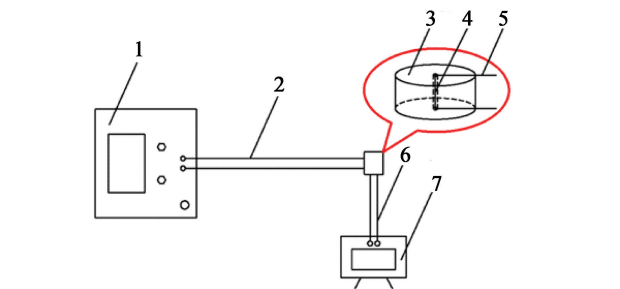
1.1 试验装置与仪器

起爆试验的等离子体由脉冲功率源经导线对金属丝放电。脉冲功率源的起爆电压在 100 ~ 1 820V 的范围内可调,储能电容器电容为 10 μ F。Hot Disk TPS2500S 导热系数仪,HiROX KH-7700 数字显微镜。图 1 为试验起爆装置示意图。

使用 Hot Disk TPS2500S 导热系数仪测试 SY 导热性,通过 HiROX KH-7700 数字显微镜观测 SY 颗粒的粒径。

1.2 试验样品及方法

通过较佳的工艺制得 SY^[10],粒度分别为 40、80 目和 150 目,每组 SY 样品分别由 1.0% (质量分数) 松虫胶、3.0% (质量分数) 铝 (Al) 粉或 0.4% (质量分数) 氟橡胶包覆。金属丝材质为 Ni-Cr 丝 (质量比



1 - 脉冲功率源;2 - 导线;3 - SY 药柱;
4 - 金属桥丝;5 - 接线头;6 - 信号线;7 - 示波器。

图 1 起爆装置示意图

Fig. 1 Initiation device diagram

为 80 : 20)、Al 丝和 W 丝。Ni-Cr 丝直径为 0.1、0.2 mm 两种,Al 丝和 W 丝直径均为 0.1mm。

使用模具将 SY 压成直径 10 mm、高 4 mm 的药柱。在药柱中心打孔,孔径 0.8 mm,通过尼龙管套约束住 SY 药柱,再将金属丝沿孔轴线穿过 SY 药柱的通孔。固定金属丝两端,连接至接线头上,并与导线相连。装配完成后,在脉冲放电仪上设定所需要的起爆电压,按下放电开关实现起爆。其燃烧转爆轰条件由 50% 发火电压表征。为了研究炸药的装药密度、粒度、金属丝的材质、直径和长度等参数对等离子体起爆的影响,采用 3 种材质的金属丝作为等离子体源,以过 40、80 目和 150 目筛的 SY 作为起爆对象。

2 结果与讨论

2.1 药柱密度对 SY 冲击转爆轰的影响

采用直径 0.1 mm、长 5.0 mm 的 Ni-Cr 丝作为等离子体源,0.4% (质量分数) 氟橡胶包覆的过 40 目的 SY 作为起爆对象。使用模具压 SY 成直径 10 mm、高 4 mm 的药柱,并通过调整质量改变药柱密度。使用桥丝起爆药柱。试验结果如表 1。

表 1 SY 药柱密度与 50% 发火电压

Tab. 1 Density of SY columns and 50% ignition voltage

样品	密度/(g · cm ⁻³)	50% 发火电压/V
1 [#]	1.43	1 652
2 [#]	1.51	1 552
3 [#]	1.56	1 323
4 [#]	1.67	1 122

根据炸药爆轰理论,一般情况下,随着装药密度增大,炸药表面孔隙率减小,就不容易吸收能量,也不利于热点的形成和火焰的传播,炸药的起爆感度

和火焰感度都会降低。由表 1 可知,在一定密度范围内,SY 药柱密度增大,则更易被等离子体起爆。出现此现象的原因是,SY 药柱密度较小时,等离子体与药柱表面接触时,能量可能会损失较大,随着密度增大,能量损失会降低。

2.2 粒度对 SY 冲击转爆轰的影响

采用直径 0.1 mm、长 5 mm 的 Ni-Cr 丝作为等离子体源。分别将 SY 过 40、80 目和 150 目筛,得到不同粒度的颗粒,并通过 HiROX KH-7700 数字显微镜观测 SY 颗粒的平均粒径。使用 0.4% (质量分数)氟橡胶包覆,压制成高 4 mm、密度 1.51 g/cm³ 的药柱。使用桥丝起爆药柱,试验结果如表 2。

表 2 SY 粒度与 50% 发火电压

Tab.2 Particle size of SY columns and 50% ignition voltage			
样品	粒度/ 目	平均粒径/ μm	50% 发火电压/ V
1 [#]	40	394	1 552
2 [#]	80	200	1 080
3 [#]	150	96	919

SY 颗粒越小,比表面积越大,接受的能量越多,易形成活化能中心的数目越多。此外,比表面积越大,反应速度越快,越容易起爆。由表 2 可知,粒径越小,SY 药柱越容易被桥丝起爆。

2.3 桥丝种类对 SY 冲击转爆轰的影响

使用 0.4% (质量分数)氟橡胶对粒径为 96 μm 的 SY 颗粒进行包覆,并压成高 4 mm、密度 1.51 g/cm³ 的药柱。SY 药柱作为起爆对象。分别以直径为 0.1 mm、长度为 5 mm 的 Ni-Cr 丝、Al 丝和 W 丝为起爆源起爆 SY 药柱,试验结果如表 3。

表 3 桥丝种类与 50% 发火电压

Tab.3 Species of bridge wire and 50% ignition voltage				
样品	材料	ignition voltage		
		比热容/ (kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	密度/ (g · cm ⁻³)	50% 发火 电压/V
1 [#]	Ni-Cr	0.46	7.85	750
2 [#]	Al	0.91	2.70	1 395
3 [#]	W	0.13	19.35	1 214

由表 3 可知,SY 药柱对 3 种等离子体感度由高到低顺序为 Ni-Cr 丝、W、Al 丝。通过高速摄影仪对几种桥丝进行观测。图 2 为 3 种桥丝在 1 200 V 电压下的爆炸图片。

试验测得,在 1 200 V 电压的条件下, Ni-Cr 丝、Al 丝和 W 丝的爆炸速度分别为 1 413、1 315 m/s 和

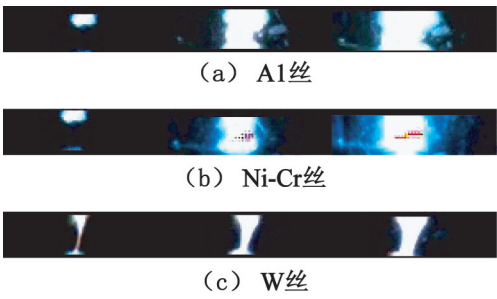


图 2 1 200 V 条件下 3 种桥丝爆炸时的膨胀图

Fig.2 Images of inflating explosive wire when voltage is 1 200 V

820 m/s。由此得知,Ni-Cr 丝和 Al 丝起爆 SY 药柱的爆炸速度远远大于 W 丝起爆 SY 药柱的爆炸速度。从表 3 中 50% 发火电压比较可得,在相同电压下产生的 W 丝等离子体对 SY 药柱的起爆能力介于 Al 丝和 Ni-Cr 丝之间,说明起爆的难易程度不仅仅取决于桥丝的爆炸速度。W 丝的密度较大,Ni-Cr 丝其次,最小密度的为 Al 丝。由冲量定义 $I = \int F dt = \Delta mv$ 可知,W 丝起爆的爆炸速度较小,但由于密度的原因,冲量仍可达到较大水平。其次,W 丝和 Ni-Cr 丝的比热容相对 Al 丝更小,在一定的电压下更容易发生电爆炸。由此可得,桥丝起爆炸药的难易程度并不仅仅取决于炸药的爆炸速度,也与桥丝的冲量及比热容有关。而 Ni-Cr 桥丝相对与其他两种桥丝来说,起爆能力更优秀。

2.4 桥丝尺寸对 SY 冲击转爆轰的影响

使用与 2.3 中相同的药柱为起爆对象,比较桥丝长度和直径对起爆的影响,起爆源材料均为 Ni-Cr 丝,改变桥丝长度和直径,测试 50% 发火电压。结果如表 4。

表 4 桥丝尺寸与 50% 发火电压

Tab.4 Size of bridge wire and 50% ignition voltage			
直径/ mm	桥丝数量/ 根	长度/ mm	50% 发火电压/ V
0.1	1	5	750
0.1	1	10	855
0.1	2(并联)	5	1 280
0.2	1	5	—

其中,当桥丝直径为 0.2 mm 时,在相对正常的电压范围内 SY 药柱未被起爆;将电压增至 3 000 V 时,药柱仍未被桥丝起爆。

由表 4 可知,随着桥丝截面积以及长度的增大,对输入总能量的需求增大,桥丝起爆效率(能量占总输入能量)降低,需要更大的能量才可以达到较

佳的输出效果。因此在一定范围内,长度以及桥丝截面积较小,更有利于桥丝起爆炸药。

2.5 导热性对 SY 冲击转爆轰的影响

利用不同的包覆材料对相同粒径(96 μm)的 SY 进行了包覆,并将 SY 压成相同的药柱,测得了不同的结果。3 种包覆条件对桥丝起爆 SY 药柱影响较大,不同包覆条件包覆后的 SY 药柱对等离子体感度由高到低的顺序为:氟橡胶、松虫胶、Al 粉。为了研究包覆条件的影响,对不同包覆条件下的 SY 药柱进行了导热系数测试。测试结果如表 5。

表 5 SY 包覆条件与热导率及 50% 发火电压
Tab.5 Coated conditions of SY columns,thermal conductivityand 50% ignition voltage

包覆材料	质量分数/%	热导率/ (W·mK ⁻¹)	50% 发火 电压/V
松虫胶	1.0	0.210 6	841
Al 粉	3.0	0.183 6	937
氟橡胶	0.4	0.232 0	750
无		0.196 0	898

由表 5 可知,导热性更强的包覆药柱 50% 发火电压越小。其中,0.4% (质量分数) 氟橡胶包覆得到的 SY 药柱热导率更大,且对 Ni-Cr 丝产生的等离子体最为敏感。说明热导率大的样品可能更易被桥丝起爆。

2.6 中心孔径对 SY 冲击转爆轰的影响

试验过程中发现,当药柱的中心孔径超过 1 mm 时,加大电压,桥丝仍不能起爆炸药柱。由于高密度炸药的孔较难生成,现使用模具将 SY 压成截面为半圆形的药柱。在两个半圆形药柱中心形成小孔,孔径分别为 0.5、0.4、0.1 mm 和 1.0 mm。药柱如图 3 所示。

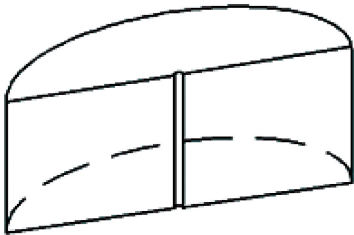


图 3 截面半圆形的药柱
Fig.3 Column with semicircular section

采用 Ni-Cr 丝为起爆源,药柱由粒径为 96 μm 的 SY 压制得到,高度 4 mm,直径 10 mm,密度1.51 g/cm³。测试结果如表 6。

测试样品由两个截面为半圆形的药柱组成,降低了 SY 药柱的约束性,相对原先的药柱较难起爆。

可以看出,在相同的条件下,孔径减小,桥丝更易起爆 SY 药柱。而当孔径增大至 1.0 mm 时,将电压调大也无法起爆 SY 药柱。说明孔径减小,则桥丝爆炸时等离子体与药柱孔表面接触的面积增大,将更有利于等离子体作用于 SY 药柱。

表 6 孔径与 50% 发火电压
Tab.6 Diameters of holes and 50% ignition voltage

样品	孔径/mm	50% 发火电压/V
1 [#]	0.5	1 058
2 [#]	0.4	900
3 [#]	0.1	820
4 [#]	1.0	—

3 结论

对于等离子体起爆炸药并使其冲击转爆轰的问题,构建了高能脉冲等离子体装置,使用 Ni-Cr 丝、W 丝及 Al 丝为等离子体源,采用桥丝穿过药柱的方式,在不同条件下起爆 SY 药柱,得到如下结论:

- 1)在一定密度范围内,SY 药柱的密度增大,更容易被等离子体起爆。在相同密度下,SY 的粒径越小,SY 药柱更容易被起爆,50% 发火电压大幅度降低。相比药柱密度,炸药粒径的影响更为显著。
- 2)相同条件下制得的 SY 药柱对 3 种金属桥丝等离子体感度由大到小顺序为 Ni-Cr 丝、W 丝、Al 丝。桥丝爆炸速度、冲量及比热容对起爆均有影响。
- 3)导热性更强的包覆 SY 药柱更容易被等离子体起爆。其中,0.4% (质量分数) 氟橡胶包覆得到的 SY 药柱对 Ni-Cr 丝产生的等离子体最为敏感。桥丝起爆 SY 药柱的难易程度和等离子体的能量输入与输出也有关。
- 4)孔径减小,等离子体与药柱孔表面接触的面积增大,桥丝更容易起爆 SY 药柱。

参 考 文 献

[1] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1999.

[2] 司守训. 电磁脉冲防护技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2006.

SI S X. Research on protection of electronic systems from electromagnetic pulse damage[D]. Hefei:Hefei University of Technology,2006.

[3] 潘邦金. 爆炸线起爆猛炸药时颗粒尺寸的实验研究[J]. 火炸药,1980(6):11-21.

[4] 钟敏,李志鹏,龙新平,等. 典型桥丝火工品静电放电响应研究[J]. 火工品,2015(3):22-25.
ZHONG M,LI Z P, LONG X P, et al. Response of typical bridge wire detonators to electrostatic discharge[J]. Initiators & Pyrotechnics,2015(3):22-25.

[5] 薛乐星, 王晓峰, 冯晓军, 等. 单质炸药在等离子体作用下的起爆响应[J]. 含能材料, 2017, 25(1): 69-75.
XUE L X, WANG X F, FENG X J, et al. Initiation response of explosive compound under action of plasma[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25 (1): 69-75.

[6] 马鹏, 朱顺官, 张垒, 等. 起爆药等离子体感度研究[J]. 含能材料, 2010, 18(1): 72-75.
MA P,ZHU S G, ZHANG L, et al. Plasma sensitivities of different kinds of primary explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(1): 72-75.

[7] PARK M I, CHOO H T, YOON S H, et al. Comparison of plasma generation behaviors between a single crystal semiconductor bridge (single-SCB) and a polysilicon semiconductor bridge (poly-SCB) [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 115(1): 104-108.

[8] LEE Y H,LEE D G,LEE S H. Dynamic deformation and ballistic properties of Ti-6Al-4V alloy 1. Ultra-high-speed exploding properties[J]. Journal of the Korean Institute of Metals and Materials,2003,41:645-651.

[9] LEE E A, DRAKE R C, RICHARDSON J. A view on the functioning mechanism of EBW detonators-part 2: briggewire output [J]. Journal of Physics: Conference Series 500,2014;052024.

[10] 马鹏. 共晶类铵盐含能材料的合成、理论计算与应用研究[D]. 南京:南京理工大学, 2013.
MA P. Synthesis,theoretical calculation and application research on cocrystal ammonium energetic materials [D]. Nanjing:Najing University of Science and Technology,2013.

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部