

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.01.008

多层 Al/Ti 纳米含能桥膜的电爆性能研究*

杨 程 胡 艳 沈瑞琪 叶迎华
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 利用磁控溅射法制备了不同调制周期的多层 Al/Ti 纳米含能桥膜,并在电容放电激励下对其电爆性能进行测试,Al/Ti 纳米含能桥膜的爆发时间随着电压的增大而降低,而等离子体持续时间随着电压的增加而增大。高速摄影仪记录的 Al/Ti 纳米含能桥膜的电爆过程表明,在相同的激励电压下,Al/Ti 纳米含能桥膜的电爆现象明显比 Al 桥膜和 Ti 桥膜剧烈,且伴随着高温粒子四处飞溅,飞溅高度约有 4~6 mm,同时 Al/Ti 纳米含能桥膜的电爆持续时间均长于 Al 桥膜和 Ti 桥膜的电爆持续时间,这与伏安特性曲线得出的结论一致。

[关键词] 纳米含能桥膜;Al/Ti;调制周期;电爆性能

[分类号] TJ45; TQ560.7

引言

在现代武器弹药系统中,火工品作为重要的组成部分和首发元件具有不可替代的作用,火工品是武器系统中的最敏感部分,其安全性、可靠性直接影响武器系统的安全性和可靠性。随着科学技术的发展,现代战争所面临的苛刻环境对火工品提出了更高的要求。

常用的多晶硅^[1]、Cr^[2]等电阻加热式单层桥膜,存在着点火输入能量较高而能量转换效率较低的缺点。新型的纳米含能薄膜火工品^[3-5]在一定的电压激励下,可以引起含能薄膜材料的化学反应,桥膜在电能和化学能共同作用下,可以实现更高能量的输出,从而提高换能元的点火能力、发火的可靠性以及火工品的安全性。

目前,纳米含能薄膜材料领域的研究主要集中在 Al/CuO^[6-10]、Al/Ni^[11-14]、B/Ti^[15-16]等材料,Al/Ti 纳米含能材料的研究相对较少。本文利用磁控溅射法制备了不同调制周期的多层 Al/Ti 纳米含能桥膜,并在电容放电激励下对其电爆性能进行了研究,通过高速摄影仪记录了 Al/Ti 纳米含能桥膜的电爆历程。

1 试验

1.1 Al/Ti 纳米含能薄膜的制备

Al/Ti 在电加热时能激烈地发生反应,发生燃烧或爆炸,并且放出大量的热量。

化学反应式如下:



由式(1)可以求得 Al/Ti 纳米含能薄膜中,单层 Al 薄膜和单层 Ti 薄膜的比值约为 1 比 1,由此设计的多层 Al/Ti 纳米含能薄膜,不同调制周期的参数如表 1 所示。

表 1 不同调制周期的 Al/Ti 纳米含能薄膜的厚度

Tab. 1 Bilayer thickness of Al/Ti nano-energetic films with different modulations

单层 Al 薄膜 厚度/nm	单层 Ti 薄膜 厚度/nm	调制周 期/nm	薄膜总 厚度/ μm
25	25	50	2
30	30	100	2
100	100	200	2

制备的点火桥形状如图 1 所示。点火桥形状为典型的蝶式结构,桥长和桥宽相同,均为 1 mm,桥膜厚度为 2 μm 。

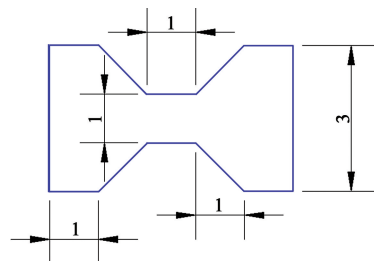


图 1 点火桥形状

Fig. 1 Image of bridge film

* 收稿日期:2014-05-25

基金项目:江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20140788);总装预研基金(9140A05070114BQ02073)

作者简介:杨程(1987~),男,博士研究生,从事 Al/Ni 和 Al/Ti 等合金化桥膜的研究。E-mail:yangchengyashua@126.com

通信作者:沈瑞琪(1963~),男,博导,教授,主要从事含能材料点火与起爆技术、火工技术、激光辐射效应研究。E-mail:rqshen@mail.njust.edu.cn

1.2 电爆性能测试

纳米含能桥膜电爆性能的测试电路示意图如图 2, 主要包括电容储能放电起爆装置 (其中电容为 $100\ \mu\text{F}$)、LeCroy 44XS-A 示波器、PP009 电压探头、CWT 30B mini Rogowski 线圈和合金化点火桥膜。

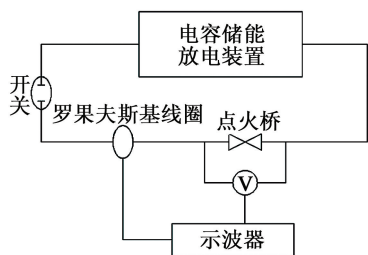


图 2 测试电路示意图

Fig. 2 Circuit test schematic

2 试验结果与讨论

2.1 Al/Ti 纳米含能桥膜的伏安特性曲线研究

桥膜电爆一般发生在电流曲线头 $1/4$ 周期, 即电流上升段, 因此, 国内外学者通常把桥箔两端电压曲线峰值对应的时间 t_1 定义为桥膜的爆炸时间; 桥膜电爆结束的时间即为电流曲线结束的时刻 t_2 。等离子体持续时间是从小 t_1 时刻开始, 一直持续到电流曲线结束时刻 t_2 , 即 $\Delta t = t_2 - t_1$ 。

经测试得到了 Al 桥膜、Ti 桥膜、调制周期 50 nm Al/Ti 纳米含能桥膜、调制周期 100 nm Al/Ti 纳米含能桥膜和调制周期 200 nm Al/Ti 纳米含能桥膜电容放电激励 (激励电压为 140 V, 电容为 $100\ \mu\text{F}$) 下的伏安特性曲线, 并由此得出 Al/Ti 系列纳米含能桥膜的爆发时间和等离子体持续的时间与充电电压之间的关系, 如图 3 和图 4 所示。

由图 3 和图 4 可知, Al/Ti 系列纳米含能桥膜的爆发时间随着电压的增大而降低。这是因为电容的时间常数 $\tau = RC$, 电容放电一般在 $3\tau \sim 5\tau$ 时间后结束, 电容充电电压升高, 电容存储的能量增大, 则单位时间作用于桥区的能量变大, 因此, 当充电电容值

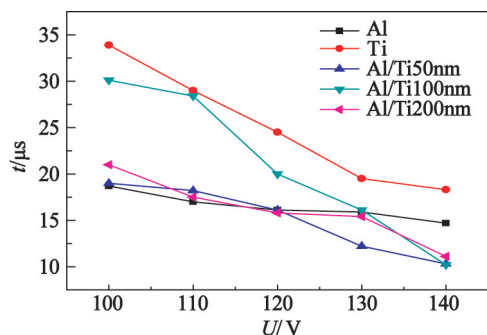


图 3 Al/Ti 纳米含能桥膜的爆发时间与电压之间的关系

Fig. 3 Relationship between outbreak time and voltage of Al/Ti nano-energetic bridge films

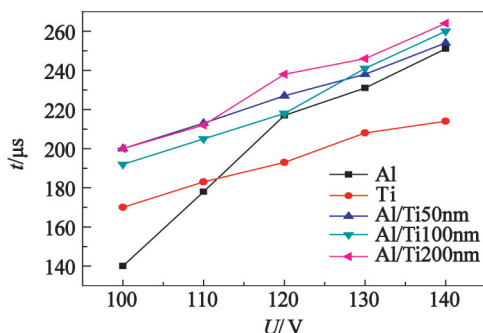


图 4 Al/Ti 纳米含能桥膜的等离子体持续时间与电压之间的关系

Fig. 4 Relationship between plasma lasting time and voltage of Al/Ti nano-energetic bridge films

一定时, 桥膜的爆发时间仅与充电电压有关, 随着充电电压增加, 爆发时间逐渐减小。

而等离子体持续时间却是随着电压的增加而增大。这是由于在桥区尺寸和桥膜厚度一定时, 爆发能量一定, 所以随着充电电压的增大, 后期等离子体放电所需的能量就变大, 因此放电时间延长。

3 种调制周期的 Al/Ti 纳米含能桥膜在充电电压一定时, 等离子体持续的时间均大于 Al 桥膜和 Ti 桥膜, 且持续时间差距较大, 最大的持续时间大约有 $60\ \mu\text{s}$, 其中, 调制周期 200 nm Al/Ti 纳米含能桥膜在充电电压为 140 V 时的等离子体持续时间最长, 为 $264\ \mu\text{s}$ 。

2.2 Al/Ti 纳米含能桥膜的电爆现象分析

图 5 ~ 图 9 分别为 Al 桥膜、Ti 桥膜、调制周期 50 nm Al/Ti 纳米含能桥膜、调制周期 100 nm Al/Ti 纳米含能桥膜和调制周期 200 nm Al/Ti 纳米含能桥膜在点火电压 140 V 下的电爆过程, 高速摄影图中每张照片之间的间隔为 $20\ \mu\text{s}$ 。

从图 5 ~ 图 9 中可以看出, 在相同的激励电压条件下触发的 5 种点火桥膜都出现了剧烈的电爆, 但 Al/Ti 纳米含能桥膜的电爆现象明显不同于 Al 桥膜和 Ti 桥膜。Al/Ti 纳米含能桥膜的等离子体形成的时间小于 Al 桥膜和 Ti 桥膜的等离子体的形成

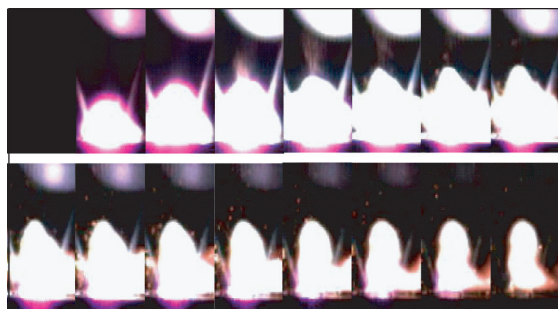


图 5 Al 桥膜的电爆过程

Fig. 5 Plasma image of Al bridge film

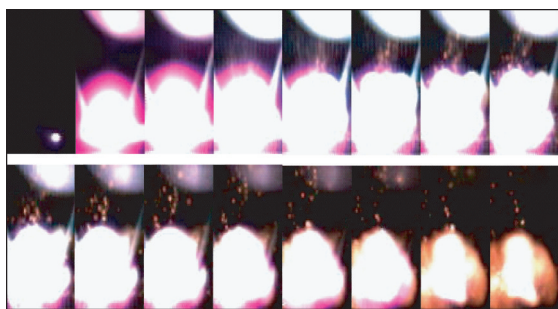


图 6 Ti 桥膜的电爆过程

Fig. 6 Plasma image of Ti bridge film

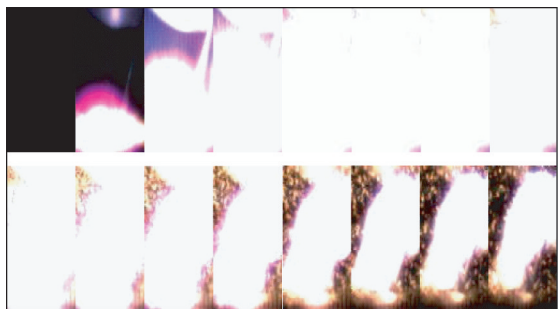


图 7 50 nm Al/Ti 纳米含能桥膜的电爆过程

Fig. 7 Plasma image of Al/Ti nano-energetic bridge films with bilayer thickness of 50 nm

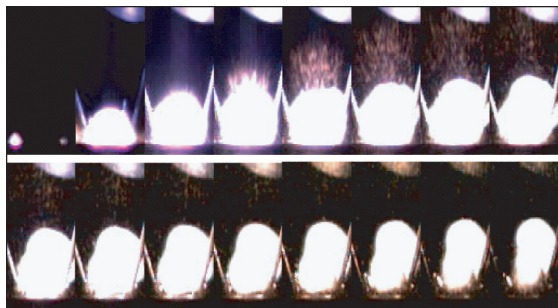


图 8 100 nm Al/Ti 纳米含能桥膜的电爆过程

Fig. 8 Plasma image of Al/Ti nano-energetic bridge films with bilayer thickness of 100 nm

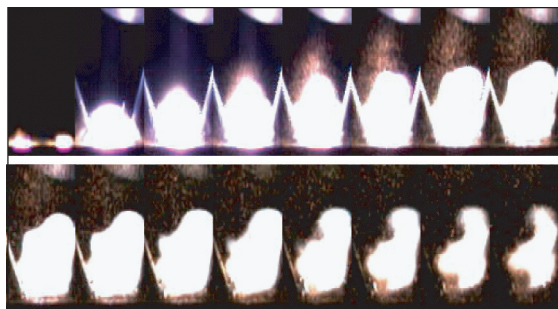


图 9 200 nm Al/Ti 纳米含能桥膜的电爆过程

Fig. 9 Plasma image of Al/Ti nano-energetic bridge films with bilayer thickness of 200 nm

时间,而 Al/Ti 纳米含能桥膜的电爆持续时间却要长于 Al 桥膜和 Ti 桥膜的电爆持续时间,这与伏安

特性曲线中得出的结论一致。

3 种不同调制周期的 Al/Ti 纳米含能桥膜不但存在着剧烈的燃烧现象,还明显伴随着高温产物粒子四处飞溅,形成了天女散花的景象,如图 7 中电爆强度最高时,光亮度如同白昼一般,表明了电爆过程中 Al/Ti 纳米含能薄膜间发生了反应。这种飞散的现象对于实现微系统的隔离点火有非常重要的研究意义。依据图中探针触角的尺寸,可以推测出高温粒子的飞溅距离约有 4 ~ 6 mm。由高速摄影图可知,3 种调制周期的 Al/Ti 纳米含能桥膜等离子体由产生到膨胀再到最大所需时间约为 100 μs ,因此,等离子的轴向膨胀速度约为 40 ~ 60 m/s。

3 结论

本文利用磁控溅射法制备了多层 Al/Ti 纳米含能桥膜,并在电容放电激励下对其电爆性能进行测试,得到了其伏安特性曲线;此外,还通过高速摄影仪研究了 Al/Ti 纳米含能桥膜电爆的整个过程,得到的结论如下:

1) Al/Ti 纳米含能桥膜的爆发时间随着电压的增大而降低,而等离子体持续时间随着电压的增加而增大。

2) 在相同的激励电压条件下触发的 5 种点火桥膜都出现了剧烈的电爆,且 3 种不同调制周期的 Al/Ti 纳米含能桥膜的电爆比 Al 桥膜和 Ti 桥膜更为剧烈,还明显伴随着高温粒子四处飞溅,飞溅距离约有 4 ~ 6 mm。

参 考 文 献

- [1] Lewis J D H, Janson S W, Cohen R B, et al. Digital micropropulsion[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000, 80(2): 143-154.
- [2] 徐超. MEMS 固体微推进器的设计与制备[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006.
- [3] Son S F, Asay B W, Foley T J, et al. Combustion of nanoscale Al/MoO₃ thermite in microchannels [J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(4): 715-721.
- [4] Prakash A, McCormick A V, Zachariah M R. Aero-sol-gel synthesis of nanoporous iron-oxide particles: a potential oxidizer for nanoenergetic materials [J]. Chemistry of Materials, 2004, 16(8): 1466-1471.
- [5] Rossi C, Zhang Kaili, Daniel E, et al. Nanoenergetic materials for MEMS: a review [J]. Journal of Micro-electro Mechanical Systems, 2007, 16(4): 919-931.
- [6] Zhu Peng, Shen Ruiqi, Ye Yinghua, et al. Energetic igniters realized by integrating Al/CuO reactive multilayer films with Cr films [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110: 074513.
- [7] Zhu Peng, Shen Ruiqi, Ye Yinghua, et al. Characteriza-

- tion of Al/CuO nanoenergetic multilayer films integrated with semiconductor bridge for initiator applications[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(18): 1-5.
- [8] Blobaum K J, Reiss M E, Plitzko J M, et al. Deposition and characterization of a self-propagating CuOx/Al thermite reaction in a multilayer foil geometry[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(5): 2923-2929.
- [9] Petrantoni M, Rossi C, Conédéra V, et al. Synthesis process of nanowired Al/CuO thermite[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2010, 71(2): 80-83.
- [10] 朱朋, 周翔, 沈瑞琪, 等. 介电式 Al/CuO 复合薄膜点火桥的电爆性能[J]. 含能材料, 2011, 19(4): 366-369.
- Zhu Peng, Zhou Xiang, Shen Ruiqi, et al. Electric-explosion performance of dielectric structure pyrotechnic initiators prepared by Al/CuO reactive multilayer films[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(4): 366-369.
- [11] Morris C J, Mary B, Zakar E, et al. Rapid initiation of reactions in Al/Ni multilayers with nanoscale layering[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2010, 71(2): 84-89.
- [12] Qiu X, Tang R, Liu R, et al. A micro initiator realized by reactive Ni/Al nanolaminates for MEMS applications [C]//16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (transducers), Beijing, 2011: 1665-1668.
- [13] 王亮, 何碧, 蒋小华, 等. Al/Ni 多层膜中反应波传播速度的理论研究[J]. 含能材料, 2009, 17(2): 233-235.
- Wang Liang, He Bi, Jiang Xiaohua, et al. Modeling the propagating velocity of reaction waves in Al/Ni multilayer films[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(2): 233-235.
- [14] Yang Cheng, Hu Yan, Shen Ruiqi, et al. Fabrication and performance characterization of Al/Ni multilayer energetic films[J]. Applied Physics A, 2014, 114: 459-464.
- [15] 王丽玲, 蒋小华, 何碧, 等. 多层含能薄膜的制备及性能表征[J]. 火工品, 2009(1): 9-11.
- Wang Liling, Jiang Xiaohua, He Bi, et al. Fabrication and performance characterization of multilayer energetic films[J]. Initiators and Pyrotechnics, 2009(1): 9-11.
- [16] Tanaka S, Kondo K, Habu H, et al. Test of B/Ti multilayer reactive igniters for a micro solid rocket array thruster[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 144(2): 361-366.

Study on Electro Explosion Performance of Al/Ni Nano-energetic Multilayer Bridge Films

YANG Cheng, HU Yan, SHEN Ruiqi, YE Yinghua

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

[ABSTRACT] Multi-layered Al/Ti nano-energetic bridge films were prepared by RF magnetron sputtering with different modulation period. Electric explosion performances were investigated when Al/Ti nano-energetic bridge films were ignited using a capacitor-discharger power supply. The outbreak time of Al/Ti nano-energetic bridge film increased with voltage decrease and plasma duration time increased with the increase of voltage. The electric explosion processes of Al bridge film, Ti bridge film and Al/Ti nano-energetic bridge films were recorded by high-speed photography respectively. The results show that Al/Ti nano-energetic bridge films have more drastic electric explosion, the high temperature splash particles of Al/Ti nano-energetic bridge films are about 4-6 mm high. And the duration of electric explosion time of Al/Ti nano-energetic bridge films is higher than Al and Ti bridge films, which are consistent with the volt-ampere characteristic curves.

[KEY WORDS] nano-energetic bridge films; Al/Ti; modulation period; electric explosion performance

山东天宝化工股份有限公司 起爆具自动浇注装配线通过工信部成果鉴定

2014年9月10日~11日,工业和信息化部在山东天宝化工股份有限公司组织召开了起爆具自动浇注装配线科技成果鉴定会,与会专家和代表听取了研制单位的研制工作汇报,审查了技术文件,考查了生产现场的运行情况,抽检了试产的起爆具产品。专家组认为,该生产线实现了起爆具生产过程中熔药、混药、浇注、计量、壳体步进、冷却、退冒口、退模、去冒口药、清理、贴标生产工序的连续化、自动化和智能化,总体技术达到了国际先进水平。

(张英豪、陈成芳)