

文章编号:1006-9941(2019)02-0155-07

多层 Al/Ni 含能薄膜在电容放电激励下的能量释放特性和规律

付帅,沈瑞琪,朱朋,叶迎华,马宏玲

(南京理工大学化工学院,江苏南京 210094)

摘要: 为了研究 Al/Ni 含能薄膜的能量释放特性和规律,采用微细加工方法制备了双“V”型夹角的 Al/Ni 含能薄膜换能元。研究了 Al/Ni 含能薄膜换能元在 47 μF 固体钽电容放电激励下的能量释放特性和规律。电爆炸测试时,用自主研制的 ALG-CN1 储能放电起爆仪作激励电源。电容器用 47 μF 固体钽电容,充电电压为 10~45 V。用高速摄影仪(HG-100K)观察换能元的发火过程。用数字示波器(LeCroy44Xs,4通道)记录换能元发火时电流、电压随时间的变化曲线。结果表明,Al/Ni 含能薄膜换能元在电容激励下的电爆过程按照电流变化率(dI/dt)可以分为三个阶段:回路寄生电感的储能,换能元的电爆炸及等离子体加热。与相同桥型的 NiCr 薄膜换能元比较,所制备的 Al/Ni 含能薄膜换能元具有输出能量高以及电爆后产生的火花飞溅距离长的特点。发火回路的寄生电感对于换能元的起爆具有重要作用。Al/Ni 含能薄膜换能元电爆炸时的输出能量主要来源于两部分:电容的输入能量和含能薄膜释放的化学能。

关键词: Al/Ni 含能薄膜;换能元;电爆性能;输出能量

中图分类号: TJ45; O76

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2018173

1 引言

含能薄膜也称反应性复合薄膜(reactive multi-layer films, RMFs),是一种二维有序材料,由两种可以发生放热反应的薄膜材料交替叠加组成。含能薄膜中反应物的厚度在纳米级,层间接触面积大且接触紧密,结构有序均匀,因此具有反应迅速、能量密度高以及反应波传播稳定等特点。此外,含能薄膜主要使用磁控溅射方法制备,与微机电系统(MEMS)中所使用的微纳加工技术相兼容。上述优点使含能薄膜材料受到了国内外学者的广泛关注。Al/Ni 含能薄膜是合金化反应性薄膜中的一种,绝热反应温度在 1900 K 左右,理论放热量为 $1.38 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$,体积能量密度可以达到 $7.18 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-3[1-2]}$,与三硝基甲苯(TNT)相当。

收稿日期:2018-06-27;修回日期:2018-09-13

网络出版日期:2018-11-29

基金项目:航天创新基金资助(CASC150710)和江苏省自然科学基金资助(BK20151486)

作者简介:付帅(1989-),男,博士研究生,主要从事含能材料和先进火工品技术研究。e-mail:fu_shuai2016@163.com

通信联系人:沈瑞琪(1963-),男,教授,主要从事含能材料和先进火工品技术研究。e-mail:rqshen@njjust.edu.cn

引用本文:付帅,沈瑞琪,朱朋,等.多层 Al/Ni 含能薄膜在电容放电激励下的能量释放特性和规律[J].含能材料,2019,27(2):155-161.

FU Shuai, SHEN Rui-qi, ZHU Peng, et al. Characteristics and Laws of Energy Release for Multilayer Al/Ni RMFs Under Capacitive Discharge Excitation[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(2): 155-161.

Al/Ni 含能薄膜在外界能量激励下,例如电、热或者激光等,可发生自蔓延燃烧反应(self-propagating high-temperature synthesis, SHS),燃烧波的传播速度最高可以达到 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1[2]}$ 。利用 Al/Ni 含能薄膜自蔓延燃烧的特点,可以将其应用在异质材料的焊接^[3]、热电池激活^[4]以及加热点火^[5]等方面。当外界激励能量以较高的能量密度快速加载在 Al/Ni 含能薄膜上,并且超过含能薄膜汽化电离所需能量时,含能薄膜可以发生电爆炸反应并且快速释放出所储存的化学能。利用 Al/Ni 含能薄膜发生电爆炸反应所具有的输出能量高、功率大等特点,可以将其应用在点火和起爆换能元中。Al/Ni 含能薄膜应用于换能元的方式主要有两种:第一种是将 Al/Ni 含能薄膜沉积到金属或者半导体桥区表面,利用底层桥区电爆生成的高温等离子体或焦耳热点燃含能薄膜并且释放出化学能;第二种是将 Al/Ni 含能薄膜直接制备成换能元,利用瞬态大电流激励 Al/Ni 含能薄膜发生电爆反应,释放出化学能,这也是本文阐述的重点。

目前国内外学者对于 Al/Ni 含能薄膜的研究主要集中在制备、表征以及扩散反应动力学等方面^[2,6-8],而对于其在换能元中的应用研究则相对较少。国内外的

部分学者^[9-12]研究对比了Cu爆炸箔和集成了Al/Ni含能薄膜的爆炸箔对飞片的驱动能力,结果表明调制周期在纳米级的Al/Ni含能薄膜可以提高飞片的速度;此外,还研究了Al/Ni含能薄膜直接作为换能元的电爆特性^[13-14],结果表明Al/Ni含能桥膜较普通金属桥膜在电爆时火焰飞溅面更大、持续时间更长,但是研究涉及的桥型尺寸较大、激励能量较高,电爆发火规律以及机理等有待进一步研究。

为了适应对未来新型火工品所提出的微型化、集成化以及低输入、高输出等要求,本研究采用微细加工技术^[14],在硅基底上批量制备出微型Al/Ni含能薄膜换能元。使用电容放电的方式激励换能元发火,并且与相同桥型的NiCr薄膜换能元作对比,研究含能薄膜的能量释放特性和规律,为Al/Ni含能薄膜在点火换能方面的应用提供参考。

2 实验部分

2.1 Al/Ni含能薄膜换能元的设计和制备

采用微细加工技术实现对Al/Ni含能薄膜换能元的批量制备。基底材料选择厚度为500 μm的单面抛光硅片(Si),利用热氧化方法在表面形成1 μm厚度的二氧化硅(SiO₂)绝缘层。绝缘层不仅起到电绝缘作用,而且还起到减少桥区发火时热量向基底传导耗散的作用。使用循环控制磁控溅射方法和图形反转剥离工艺在基底上沉积Al/Ni含能薄膜,制备的具体过程可参考前期的研究工作^[14-15]。单个换能元的尺寸为1.5 mm×1.0 mm,发火桥区为双“V”型(夹角为90°),尺寸为380 μm×80 μm。此结构可以在桥区尖端形成高电流密度区,有利于桥区的发火^[16]。Al/Ni含能薄膜中的单层Al、Ni薄膜厚度分别为45 nm和30 nm,共有20个调制周期,总厚度为1500 nm。换能元的平均电阻为0.7 Ω,标准偏差为0.046 Ω,其外观形貌和结构如图1所示。

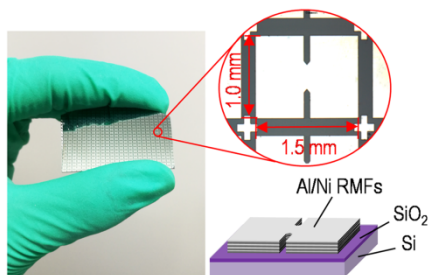


图1 Al/Ni含能薄膜换能元的形貌和结构示意图

Fig.1 Schematic diagrams of the morphology and structure for the Al/Ni RMFs initiator

2.2 Al/Ni含能薄膜换能元的电爆测试

用南京理工大学自主研制的ALG-CN1储能放电起爆仪作为激励电源。电容器使用47 μF固体钽电容,充电电压为10~45 V。用高速摄影仪(HG-100K)观察换能元的发火过程,数字示波器(LeCroy44Xs,4通道)记录换能元发火时的电流、电压随时间变化曲线。测试装置示意图如图2所示,测试时,先给电容器充电,之后断开充电回路,闭合放电回路,使换能元发火。

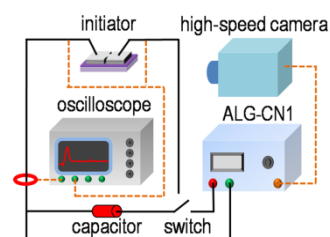


图2 换能元电爆测试系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the electrical explosion test system for initiator

3 结果与讨论

3.1 Al/Ni含能薄膜的微观结构

有关Al/Ni含能薄膜的成分和热力学分析已经在前期做过公开报道^[15],本研究只对Al/Ni含能薄膜的微观结构进行分析。用场发射电子显微镜(FESEM, Zeiss Merlin Compact)对Al/Ni含能薄膜横截面和单层Ni、Al薄膜表面的微观结构进行表征,结果如图3所示。由图3可见,Al薄膜中的晶粒呈致密的块状结构,而Ni薄膜中的晶粒呈疏松的细纤维状结构。根据溅射薄膜构造带模型(SZM)^[17-18]可以分析造成Al、Ni薄膜晶粒结构不同的原因:在磁控溅射过程中,从靶材飞溅出来的粒子在沉积到基底表面上时,主要受到表面扩散能力和阴影效应的影响。其中阴影效应是指已经沉积到表面的粒子团对即将沉积的粒子所造成的遮挡阻碍作用。当沉积粒子的表面扩散能力较弱时,粒子受到阴影效应的影响较强,新沉积粒子只能在已经成核的晶粒顶端继续成核生长,逐渐生长为细纤维或柱状晶粒;当沉积粒子的表面扩散能力较强时,可以逐渐摆脱阴影效应的影响,在基底表面做扩散移动。此时新沉积粒子可以在已经成核的晶粒外表面进行外延生长,逐渐生长为边界致密的块状晶粒。在相同的溅射沉积条件下,沉积粒子的表面扩散能力主要受到基底相对温度(T_s/T_m)的影响,其中 T_s 是基底的温度, T_m 是沉积材料的熔点。用K型热电偶测量得到基片温度 $T_s=350$ K。根据物化手册^[19]可以得到Al的熔点 $T_{m,Al}=$

933 K 和 Ni 的熔点 $T_{m,Ni}=1728$ K。通过计算得到 Al 和 Ni 粒子的 T_s/T_m 分别为 0.38 和 0.20, 表明 Al 粒子的表面扩散能力要强于 Ni 粒子。由 SZM 模型可知, 当 T_s/T_m 为 0~0.3, 薄膜晶粒主要形成 1 区结构, 即疏松的细纤维结构; 当 T_s/T_m 为 0.3~0.5, 薄膜晶粒主要形成 2 区结构, 即致密的块状结构。因此, 本研究所制备的 Al/Ni 含能薄膜中的 Al 薄膜晶粒主要呈致密的块状结构, 而 Ni 薄膜晶粒主要呈疏松的细纤维状结构。

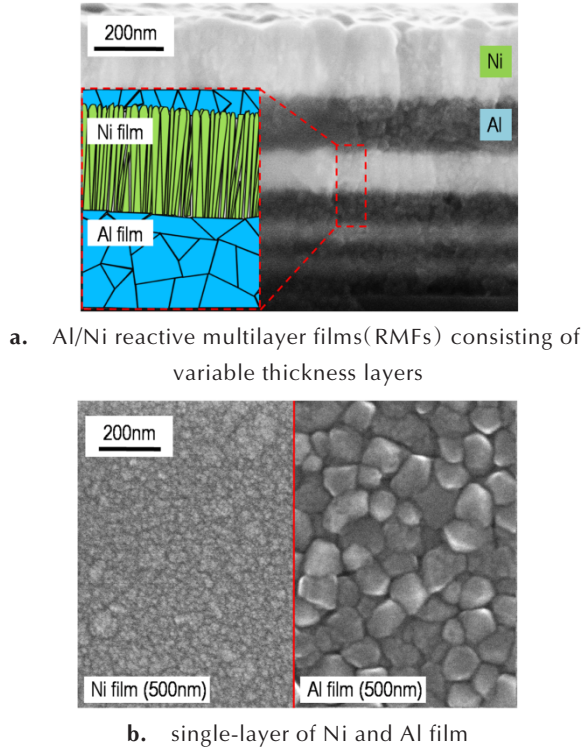


图 3 Al/Ni 含能薄膜横截面以及单层 Ni、Al 薄膜表面的 SEM 图
Fig.3 SEM images of the cross section of Al/Ni RMFs and the surface of single layer of Ni and Al film

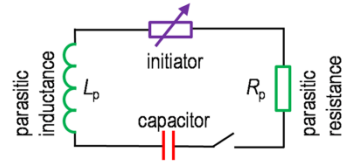
3.2 Al/Ni 含能薄膜换能元的电爆特性

用电容放电方式激励换能元发火的电路可以等效为如图 4a 所示的 R-L-C 电路, 换能元在电路中相当于可变电阻。图 4b 是 Al/Ni 含能薄膜换能元在电容 47 μ F、充电电压 30 V 的激励条件下发生电爆时得到的典型电流、电压随时间变化曲线。根据图 4b 中电流变化率 (dI/dt) 可以将换能元的电爆过程分为三个阶段。

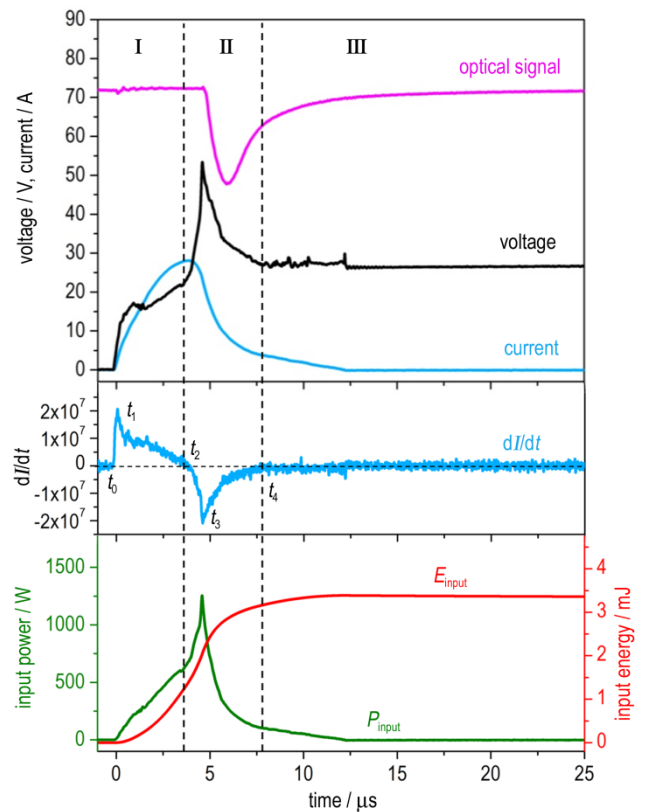
I 阶段, 从 t_0 到 t_2 , 在此阶段, 电容释放的能量主要转换为寄生电感的磁场能量以及换能元和寄生电阻热能, 此过程中的能量转换可以表示为:

$$\frac{C}{2} (V_1^2 - V_0^2) = \frac{1}{2} L_p I^2 + \int_{t_0}^{t_2} U(t) \cdot I(t) dt + \int_{t_0}^{t_2} I(t)^2 \cdot R_p dt \quad (1)$$

式中, C 为电容, F ; V_0 和 V_1 为电容的初始电压和放电后电压, V ; L_p 为回路的寄生电感, H ; I 为回路电流, A ; $I(t)$ 和 $U(t)$ 为电流、电压随时间的函数; R_p 为回路的寄生电阻, Ω 。



a. schematic of the capacitive discharge circuit



b. waveforms from the open-air electrical explosion tests of the Al/Ni RMFs initiator under 30 V/47 μ F

图 4 电容放电的等效回路和 Al/Ni 含能薄膜换能元的典型电爆曲线

Fig.4 Equivalent circuit of the capacitive discharge and typical electrical explosion curves of the Al/Ni RMFs initiator

Al/Ni 含能薄膜换能元的桥区在 t_1 时刻吸收热量并且开始融化, 电阻迅速增大, 此时回路中的电流上升率 dI/dt 开始减小, t_2 时刻回路中的电流达到最大值。

II 阶段, 从 t_2 到 t_4 , 也是换能元发生电爆的阶段。Al/Ni 含能薄膜换能元的桥区在 t_2 时刻开始汽化, 此时回路中的电流开始减小。 t_3 时刻汽化的桥区材料发生电爆并且生成等离子体, 此时伴随有强烈的光信号产

生。值得注意的是,在 t_3 时刻加载在换能元上的电压峰值达到了 54 V,远高于电容的充电电压 30 V。上述现象可以使用 $R-L-C$ 电路放电机理来解释: t_2 时刻后,由于桥区汽化,换能元电阻迅速升高,因此回路中的电流开始迅速减小。根据楞次定律(Lenz's Law)^[20],此时寄生电感为了抵抗回路中电流的变化,开始对外释放能量。在 t_3 时刻 dI/dt 达到极值,此时加载在换能元两端的电压主要来源于寄生电感的输出电压。根据理论放电公式^[20]计算得到回路的寄生电感约为 $3.0 \mu\text{H}$ 。 t_3 时刻寄生电感的输出电压 $U=LdI/dt$ 约为 60 V,接近换能元两端的峰值电压。计算过程中没有考虑寄生电阻的分压和数据的测量误差,是导致计算值高于实际值的主要原因。

III 阶段,从 t_4 到最后放电完成,此时回路中仍然有小电流继续流过等离子体,对其进行加热,因此也称此阶段为等离子体加热阶段。从图 4b 中的输入功率、能量曲线可以看出,此阶段输入换能元的能量非常少,90% 以上的能量输入是在前两个阶段完成的。

3.3 Al/Ni 含能薄膜换能元的能量释放

为了对比 Al/Ni 含能薄膜换能元与普通金属薄膜换能元在能量释放规律上的区别,制备了与 Al/Ni 含能薄膜换能元桥型相同的 NiCr 薄膜换能元(薄膜厚度为 500 nm,平均电阻为 7.9Ω ,标准偏差为 1.085Ω)。图 5 是 NiCr 薄膜换能元在电容 $47 \mu\text{F}$ 、充电电压 30 V 的激励条件下的典型电爆曲线,表 1 是 Al/Ni 含能薄膜换能元和 NiCr 薄膜换能元在 $47 \mu\text{F}$ 电容激励下的临界发火电压对比。

Al/Ni 含能薄膜换能元的能量释放规律较 NiCr 薄膜换能元主要有以下三个方面的差异:第一,Al/Ni 含能薄膜换能元的电阻小于 NiCr 薄膜换能元,并且二者的汽化电离率不同,因此在相同的激励条件下,Al/Ni 含能薄膜换能元的电爆峰值电流显著高于 NiCr 薄膜换能元,如图 4b 和图 5 所示。第二,Al/Ni 含能薄膜换能元的临界发火电压小于 NiCr 薄膜换能元。如表 1 所示,两种样品在 10~35 V 范围内、间隔 5 V 的条件下各测试 5 发,得到不同激励电压下的换能元发火数目。结果表明,Al/Ni 含能薄膜换能元在 $47 \mu\text{F}$ 电容放电激励下的临界发火电压为 15 V,小于 NiCr 薄膜换能元的临界发火电压。第三,Al/Ni 含能薄膜换能元与相同桥型的 NiCr 薄膜换能元相比,在电爆后产生的火花飞溅距离更长,有利于提高换能元的间隙点火能力。图 6 是两种换能元在电容 $47 \mu\text{F}$ 、充电电压 30 V 的激励条件下的典型电爆过程高速摄影图像。由图 6 可

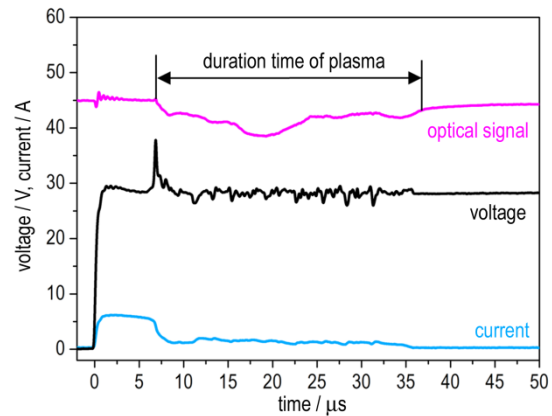


图 5 NiCr 薄膜换能元在激励条件 30 V/47 μF 下的典型电爆曲线

Fig.5 Typical electrical explosion curves of the NiCr film initiator under the excitation condition of 30 V/47 μF

表 1 Al/Ni 含能薄膜换能元和 NiCr 薄膜换能元的临界发火电压对比

Table 1 Comparison of the critical firing voltage for the Al/Ni RFMs and NiCr film initiators

voltage / V	firing number	
	Al/Ni initiator	NiCr initiator
35	5	5
30	5	5
25	5	5
20	5	2
15	5	0
10	0	0

见,Al/Ni 含能薄膜换能元电爆后溅射出大量的火花,“火焰”高度可以达到约 3 mm,明显高于 NiCr 薄膜换能元。此外,通过对比图 4b 和图 5 中的换能元电爆产生的等离子体光信号可知,虽然 Al/Ni 含能薄膜换能元的等离子体持续时间小于 NiCr 薄膜换能元,但是等离子体强度要高于 NiCr 薄膜换能元。说明 Al/Ni 含能薄膜换能元能在较短的时间内输出更高的能量,即输出功率更高。综上所述,Al/Ni 含能薄膜释放的化学能可以显著提高换能元的输出能量,其电爆后溅射出的大量火花有利于间隙点火。

换能元的点火能力与其电爆的输出能量有关。对于普通金属薄膜换能元,不考虑薄膜的热损失,则输出能量等于电容输入到换能元的能量,但是对于 Al/Ni 含能薄膜换能元,其输出能量等于电容输入能量和含能薄膜反应释放的化学能量之和,可以表示为:

$$E_{\text{output}} = \int_{t_0}^t U(t) \cdot I(t) dt + S(d_{\text{Al}}\rho_{\text{Al}} + d_{\text{Ni}}\rho_{\text{Ni}})\eta Q \quad (2)$$

式中, E_{output} 为换能元电爆的输出能量, J; $I(t)$ 和 $U(t)$ 为电爆过程中换能元两端的电流、电压随时间变化的函数; t_0 和 t 为换能元电爆开始和结束时刻, s; S 为换能元桥区电爆面积, 即图 6a 右侧使用红框标示出的电爆区域, cm^2 ; d 为薄膜厚度, cm; ρ 为材料体密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$;

η 为薄膜密度与材料体密度的比值, 取 0.9; $Q=1134.6 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 为使用差示扫描量热法 (DSC) 测出的 Al/Ni 含能薄膜化学反应放热量^[15]; 对于 NiCr 薄膜换能元, 由于电爆时没有化学反应参与, 因此 $Q=0$, 即输出能量的第二项为零。

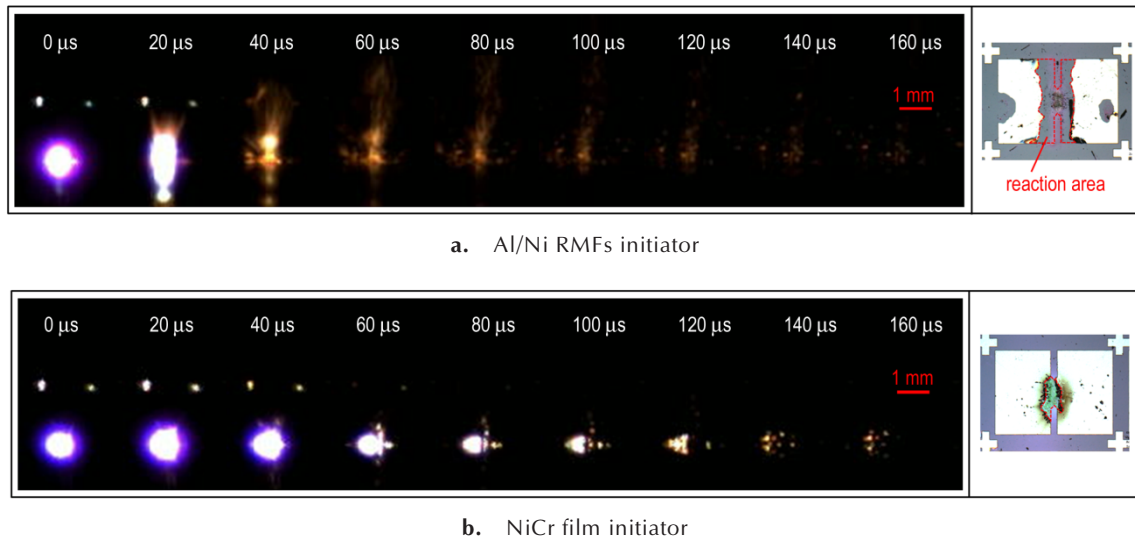


图 6 Al/Ni 含能薄膜换能元和 NiCr 薄膜换能元在激励条件为 30 V/47 μF 下的电爆过程图像以及电爆后的桥区形貌

Fig.6 The electrical explosion process images of Al/Ni RFMs and NiCr film initiators under excitation conditions of 30 V/47 μF and the morphology of the bridge region after electrical explosion

根据式 (2) 计算得到的 Al/Ni 含能薄膜换能元和 NiCr 薄膜换能元在不同激励电压下的输出能量对比如图 7 所示。由图 7 可见, Al/Ni 含能薄膜释放的化学能可以显著提高 Al/Ni 含能薄膜换能元的输出能量。需要注意的是, 随着激励电压的提高, 桥区的发火面积增大、化学能输出增加, 但是由于 Al/Ni 含能薄膜中的化学能储量有限, 因此化学能对于总输出能量的贡献作用也是有限的。当激励电压从 20 V 提高到 30 V 时, 化学能在总输出能量中的占比由 28% 提高到了 40%, 但是当激励电压继续提高到 45 V 时, 化学能在总输出能量中的占比却由 40% 降低到了 36%。可以预料, 当激励电压继续提高, 化学能对于总输出能量的贡献还将继续降低, 当激励电压足够高时, 即电容的输入能量远远高于含能薄膜释放的化学能时, 化学能对于输出能量的贡献可以忽略。以上结果表明, 相较 NiCr 薄膜换能元, Al/Ni 含能薄膜反应释放的化学能可以显著提高换能元的输出能量, 但是化学能对于总输出能量的贡献作用是有限的。激励电压为 30 V 时, 化学能对于 Al/Ni 含能薄膜换能元的输出能量贡献最高, 可以达到 40%, 当激励电压继续提高后, 化学能对

总输出能量的贡献开始降低。

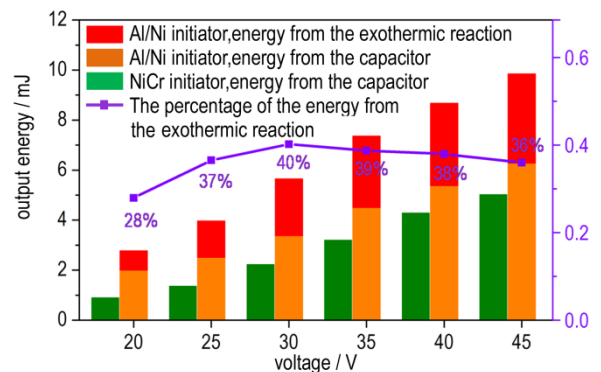


图 7 Al/Ni 含能薄膜换能元和 NiCr 薄膜换能元在不同激励电压下的输出能量对比

Fig.7 Comparison of the output energy for the Al/Ni RFMs and NiCr film initiators under different excitation voltages

4 结论

(1) Al/Ni 含能薄膜中的 Al 和 Ni 薄膜分别由致密块状和疏松细纤维状晶粒组成。根据 SZM 模型, 晶粒结构主要与溅射过程中 Al 和 Ni 粒子的表面扩散能力有关。Al 和 Ni 薄膜的基底相对温度 T_s/T_m 分别为 0.38

和0.20,说明Al粒子的表面扩散能力要强于Ni粒子。

(2) 用微细加工技术可以实现微型Al/Ni含能薄膜换能元的批量制备,所制备的换能元尺寸一致,外形完好,单个换能元的平均电阻为0.7 Ω ,标准偏差为0.046 Ω 。

(3) Al/Ni含能薄膜换能元在47 μF 电容放电激励下的电爆过程可以按照电流变化率 dI/dt 分为三个阶段:回路寄生电感的储能,寄生电感和电容共同激励换能元桥区发生电爆,以及等离子体加热阶段。其中电容输入到换能元中的能量有90%以上是在前两个阶段完成。

(4) Al/Ni含能薄膜换能元具有激发能量低、输出能量高以及电爆后产生的火花飞溅距离长等特点。Al/Ni含能薄膜换能元电爆时的输出能量主要来源于两部分:电容的输入能量和含能薄膜释放的化学能。含能薄膜释放的化学能可以显著提高Al/Ni含能薄膜换能元的输出能量,但是由于含能薄膜中的化学能储量有限,因此化学能对于输出能量的贡献作用也是有限的。

参考文献:

- [1] 朱朋. 基于含能复合薄膜的非线性电爆换能元[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
ZHU Peng. Non-linear electro-explosive devices based on energetic multilayer films [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [2] Rogachev A S. Exothermic reaction waves in multilayer nanofilms[J]. *Russian Chemical Reviews*, 2008, 77(1): 22-38.
- [3] Simoes S, Viana F, Kocak M, et al. Microstructure of reaction zone formed during diffusion bonding of TiAl with Ni/Al multilayer [J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2012, 21(5): 678-682.
- [4] Ding M S, Krieger F C, Swank J A. Developing nano foil-heated thin-film thermal battery [R]. Army research lab Adelphi MD sensors and electron devices directorate, 2013.
- [5] 张彬, 褚恩义, 任炜, 等. MEMS火工品换能元的研究进展[J]. 含能材料, 2017, 25(5): 428-436.
ZHANG Bin, CHU En-yi, REN Wei, et al. Research progress in energy conversion components for MEMS initiating explosive device [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(5): 428-436.
- [6] Baras F, Turlo V, Politano O, et al. SHS in Ni/Al nanofoils: A review of experiments and molecular dynamics simulations [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(8): 91-111.
- [7] Azadmanjiri J, Berndt C C, Wang J, et al. Nanolaminated composite materials: structure, interface role and applications [J]. *Rsc Advances*, 2016, 6(111): 109361-109385.
- [8] 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 Xiao-hua, et al. Modeling the propagating velocity of reaction waves in Al/Ni multilayer films [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(2): 233-235.
- [9] Morris C J, Mary B, Zakar E, et al. Rapid initiation of reactions in Al/Ni multilayers with nanoscale layering [J]. *Journal of Physics & Chemistry of Solids*, 2010, 71(2): 84-89.
- [10] 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 Yao, SUN Xiu-juan, GUO Fei, et al. Study on electrical characteristic and flyer driven ability of Al/Ni exploding foil [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2016(3): 5-8.
- [11] 邱林俊. 含能多层膜的制备及电爆炸性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2016.
QIU Lin-jun. Preparation of energetic multilayer film and study of the electrical explosion performance [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2016.
- [12] Wang T, Zeng Q, Li M. Characterization and application of Al/Ni reactive multilayers in exploding foils [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2017, 14(3): 547-558.
- [13] Yang C, Hu Y, Shen R, et al. Fabrication and performance characterization of Al/Ni multilayer energetic films [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 114(2): 459-464.
- [14] 王成玲, 叶迎华, 沈瑞琪, 等. 图形反转剥离工艺用于复合含能点火桥膜的制备[J]. 火工品, 2012(4): 1-5.
WANG Cheng-ling, YE Ying-hua, SHEN Rui-qi, et al. Image reversal lift-off process for fabrication of energetic multilayer ignition bridge films [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012(4): 1-5.
- [15] 李东乐, 朱朋, 付帅, 等. Al/Ni和Al/Ti纳米多层薄膜制备与表征[J]. 含能材料, 2013, 21(6): 749-753.
LI Dong-le, ZHU Peng, FU Shuai, et al. Fabrication and characterization of Al/Ni and Al/Ti multilayer nanofilms [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(6): 749-753.
- [16] 杨贵丽. 微型半导体桥换能及发火规律研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2010.
YANG Gui-li. Study on energy conversion and firing regularity of micro-semiconductor bridge [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010.
- [17] Mukherjee S, Gall D. Structure zone model for extreme shadowing conditions [J]. *Thin Solid Films*, 2013, 527(1): 158-163.
- [18] Ohring M. *Materials Science of thin films*, 2nd ed [M]. San Diego: Academic Press, 2001.
- [19] Haynes W M. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 95th ed [M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [20] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
ZHANG Ren-yu, CHEN Chang-yu, WANG Chang-chang, et al. High voltage test techniques [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.

Characteristics and Laws of Energy Release for Multilayer Al/Ni RMFs Under Capacitive Discharge Excitation

FU Shuai, SHEN Rui-qi, ZHU Peng, YE Ying-hua, MA Hong-ling

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

Abstract: To investigate the characteristics and laws of energy release for Al/Ni reactive multilayer films (RMFs), Al/Ni RMFs initiator with double “V” type angle was fabricated by a micro-fabrication method and its characteristics and laws of energy release under 47 μF solid tantalum capacitor discharge excitation were studied. When electric explosion testing, the self-developed ALG-CN1 energy storage discharge detonator was used as an excitation power source. A 47 μF solid tantalum capacitor with a charging voltage of 10 V to 45 V was used. A high-speed camera (HG-100K) was used to observe the firing process of the initiator. A digital oscilloscope (LeCroy44Xs, 4 channels) was used to record the current and voltage curves of the initiator. Results show that the electrical explosion process of Al/Ni RMFs initiator can be divided into three stages according to the change rate of current (dI/dt): energy storage of parasitic inductance, electrical explosion of initiator and plasma heating. Comparison with NiCr film initiator of same bridge type, under the same excitation condition of 30 V/47 μF , the fabricated Al/Ni RMFs initiator has high output energy and long spark spattering distance after electrical explosion. The parasitic inductance of the firing circuit plays an important role in the initiation of the initiator. The output energy of Al/Ni RMFs initiator during electric explosion mainly comes from two parts: the input energy of capacitor and the chemical energy released by energetic film. When the excitation voltage is 30 V, the chemical energy contributes to the output energy of Al/Ni RMFs initiator is higher, which can reach 40% of the total output energy.

Key words: Al/Ni reactive multilayer films; initiator; electrical-explosion performance; output energy

CLC number: TJ45; O76

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018173