

文章编号:1006-9941(2023)06-0568-09

Cu箔晶体微观形貌对爆炸箔起爆器的性能影响试验研究

韩克华^{1,2},曾鑫¹,赵婉君¹,褚恩义²,焦清介¹

(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京100081;2.陕西应用物理化学研究所应用物理化学国家级重点实验室,陕西西安710061)

摘要:为研究Cu箔微观形貌及内部晶体组织结构对爆炸箔起爆器(Exploding Foil Initiator,EFI)性能的影响规律,采用闭合场非平衡磁控溅射离子镀技术和Lift-Off刻蚀法,在150,450 W和800 W溅射功率条件下制备了3种不同晶体形貌的Cu箔,并开展相应爆炸箔(Exploding Foil,EF)电爆炸性能,飞片速度以及EFI发火性能的试验研究。试验结果表明:3种溅射功率对应样品的平均晶粒尺寸分别为19.6~36.7 nm,41.5~62.9 nm和58.6~80.2 nm,表面平均粗糙度分别为6.7,16.9 nm和46.2 nm,附着力分别为42.436,55.569 mN和71.135 mN。溅射功率为800 W时制备的Cu箔晶粒尺寸最大且分布最均匀,晶粒沉积致密平整,晶界较少,表面粗糙度最大,附着力最强,Cu(1 1 1)晶面的衍射峰最高,相应EF的电阻值和电感值最小,电爆炸能量利用率和飞片速度最高,集成的EFI 50%发火感度比溅射功率为450 W和150 W获得的样品分别高19.1%和22.6%。

关键词:爆炸箔起爆器;Cu箔;微观形貌;电爆炸;飞片速度;发火性能

中图分类号:TJ45

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2023037

0 引言

爆炸箔起爆器(Exploding Foil Initiator,EFI)中的Cu箔是能量转换的核心材料器件^[1-2],其形状、几何尺寸和材料是影响EFI起爆性能的主要参数,研究人员对此展开大量研究以进一步提高EFI的能量利用率、降低EFI的发火电压。例如,钱勇等^[3]通过试验测试3种不同形状爆炸箔(Exploding Foil,EF)的电爆特性,提出圆形EF能够提高能量利用率和降低发火能量。周密等^[4-5]通过对Cu箔夹角和桥箔厚度进行优化设计,认为夹角为45°,厚度为3 μm的Cu箔,具有较好的电爆性能和较高的能量利用率。李艺等^[6]研究了桥翼形状对电爆特性及飞片速度的影响,认为改变桥翼形状对电爆特性的影响较小,但圆形桥翼相比于蝶形

桥翼对飞片速度有一定提升,在形成等离子过程中,电流能被更有效的利用。针对不同材料EF的性能研究,冯长根等^[7-8]对Cu、Au、Au-Pt合金和Al 4种EF的爆发过程进行数值计算,认为Cu和Au桥箔爆发特性较好,能量利用率较高。杨爽等^[9]通过测试Ni/Cu复合多层膜电爆炸等离子发射光谱强度和温度发现,在相同条件下Ni/Cu复合材料电爆炸储能密度更高。王窃等^[10-12]测试了Al/Ni复合EF的电爆炸性能,提出相比于Cu EF,复合EF的能量利用率更高,所需激发能量更低。郭菲等^[13-14]通过电子束蒸发和磁控溅射工艺制备了Cu EF,测试结果表明,磁控溅射制备的桥箔电阻率更高,驱动飞片的能力略强,所需起爆能量也更低。

上述工作主要研究了桥箔形状、尺寸、材料和制造工艺等宏观参数对EF电爆炸性能以及EFI发火性能的规律。然而,材料性能不仅取决于它的宏观特性,更大程度上依赖于其微观形貌及内部的晶体组织结构^[15-16]。采用各种原子沉积技术生长的薄膜,一般都是呈强烈织构的多晶体,织构特征对其磁学性能、电学性能和薄膜致密性以及附着力都有很大影响,进而影响到表面及界面的结构和器件的物理性质^[17-18]。Cu

收稿日期:2023-03-02;修回日期:2023-03-26

网络出版日期:2023-05-18

基金项目:国家“十四五”基础科研项目(90903050301)

作者简介:韩克华(1981-),男,研究员,主要从事爆炸箔火工品技术研究。e-mail:kehuahan@126.com

通信联系人:曾鑫(1994-),女,助理研究员,主要从事先进火工品技术、含能材料技术研究。e-mail:zengxinbit@163.com

引用本文:韩克华,曾鑫,赵婉君,等. Cu箔晶体微观形貌对爆炸箔起爆器的性能影响试验研究[J]. 含能材料,2023,31(6):568-576.

HAN Ke-hua, ZENG Xin, ZHAO Wan-jun, et al. Effect of Micro Morphology and Crystal Structure of Copper Foil on the Performance of Exploding Foil Initiator[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(6):568-576.

箔作为一种金属薄膜,是EFI的核心换能器件,其微观形貌以及内部晶体组织结构对EFI的性能影响目前还没有相关报道。据此,本研究采用闭合场非平衡磁控溅射离子镀技术和 Lift-Off 刻蚀法,在不同溅射功率条件下制备了3种Cu箔并对其晶体形貌进行表征,开展了3种不同晶体形貌的EF电爆炸性能和飞片速度以及EFI的点火性能试验研究,为EFI的可靠性和低成本化设计提供技术支撑和理论基础。

1 试验

1.1 样品制备

(1) EF 样品制备

试验用EF采用闭合场非平衡磁控溅射离子镀技术和 Lift-Off 刻蚀法进行制备,具体制备工艺如下:首先用丙酮和去离子水将 Al_2O_3 陶瓷超声清洗 15 min 后烘干;而后给陶瓷基底涂覆光刻胶,用光刻掩模板掩盖住光刻胶表面,在强光下曝光,再将基底进行显影,最后用 FeCl_3 刻蚀液刻蚀;采用磁控溅射方法将纯度为 99.6% 的金属 Cu 溅射沉积在光刻蚀后的陶瓷基底上,溅射厚度 $(4 \pm 0.2) \mu\text{m}$,然后去除光刻胶,得到 Cu 箔。为得到不同晶体形貌的 Cu 箔样品,采用英国 Teer 公司生产的 UDP450 型闭合场非平衡磁控溅射镀膜机,真空度为 $3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$,直流电源分别在 150, 450 W 和 800 W 的功率下溅射 Cu 靶,对应的 Cu 膜沉积速率分别为 $0.285, 0.855 \mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $1.52 \mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$,根据沉积速率,可以通过设置溅射功率和时间,确保 Cu 箔的溅射厚度保持一致。在上述3种溅射功率条件下,制备的Cu箔换能器件样品分别为样品1#,2#和3#,如图1a~1c所示,其Cu箔桥区尺寸均为 $0.5 \text{ mm}(h) \times 0.5 \text{ mm}(w) \times 4 \mu\text{m}(d)$ 。

(2) EFI 制备

分别采用上述3种溅射功率制备的EF进行EFI组装,分别记为A,B,C。其中EFI的组成结构如图2a所示,主要由电极塞(壳体)、EF、飞片、加速膛、HNS-IV药柱和壳体组成,其中飞片采用厚度为 $25 \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺;加速膛采用厚度为 0.4 mm 的氧化铝陶瓷材料,孔径为 0.6 mm ,HNS-IV药柱的尺寸为 $\Phi 4.2 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,装药密度为 $1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (92% TMD),壳体采用厚度为 0.2 mm 的不锈钢冲压而成,所制备的EFI实物如图2b所示。

1.2 试验设备及原理

(1) EF 样品表征

采用美国 Veeco 公司生产 Dektak 150 型台阶仪

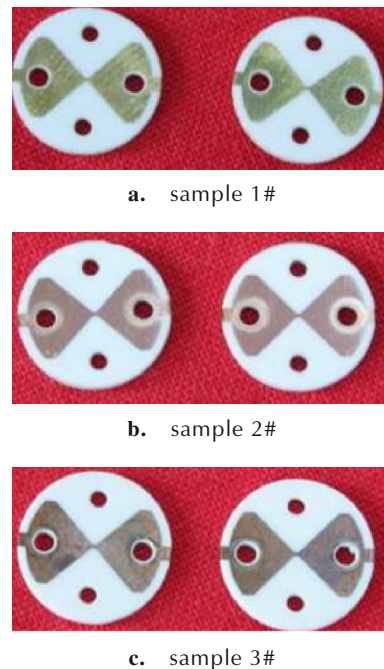
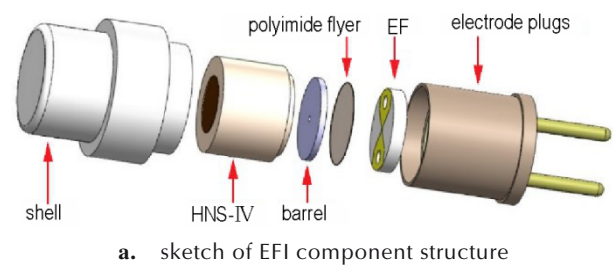


图1 不同溅射功率下制备的EF样品

Fig.1 Images of EF samples at different sputtering power



a. sketch of EFI component structure



b. images of the integrating EFI samples

图2 EFI结构及样品

Fig.2 Sketch of EFI component structure and images of EFI samples

测量样品的厚度,采用广州标格达精密仪器有限公司生产的BGD 500数显拉开法附着力测试仪测量对Cu箔与基底间的附着力。采用捷克TESCAN公司生产的VEGA TS5136XM型扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)表征样品的表面微观形貌,采用上海爱建纳米科技发展有限公司生产的AJ-III型原

子力显微镜(Atomic Force Microscopy, AFM)对样品的表面形貌和粗糙度进行分析,采用德国布鲁克公司生产的D8ADVANCE型X射线衍射仪(X-Ray Diffraction, XRD)对样品的晶相结构和组成成分进行分析,扫描范围为 $40^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。

(2) EF电爆性能试验原理及设备

Cu箔电爆性能试验原理框图如图3所示,采用输出电压为 $0\sim 4$ kV,精度为1%的高压直流电源给型号规格为CT41L/ $0.22\ \mu\text{F}/3.0$ kV的高压脉冲电容器充电;采用输出 $0\sim 3$ kV可调脉冲电压、脉冲上升时间不大于 $100\ \text{ns}$ 、脉冲下降时间不大于 $1\ \mu\text{s}$ 的脉冲触发电源为型号规格为RQ-8001的高压开关(冷阴极触发管)提供触发信号,使得高压开关闭合时,高压脉冲电容器C对EF进行放电,回路中的放电电流曲线 $I(t)$ 与EF两端的电压变换曲线 $U(t)$ 采用型号规格为5008C的罗氏线圈和衰减1000倍的高压探头进行测量,数据采用采样速率不低于 $1\ \text{GS}\cdot\text{s}^{-1}$ 的数字存储示波器进行读取。

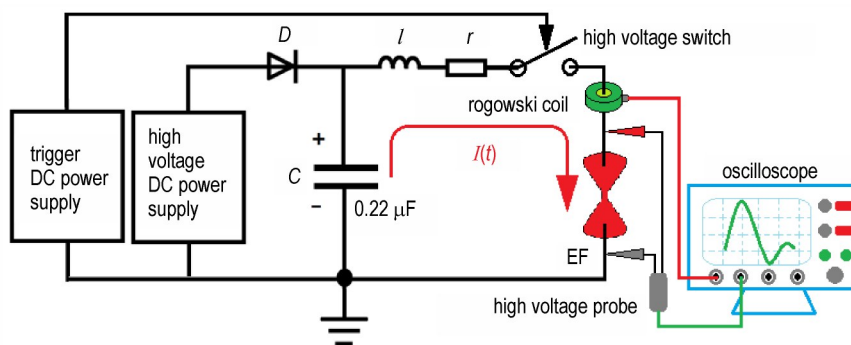


图3 电爆性能试验原理图

Fig.3 Schematic diagram of the electrical explosion performance measurement system

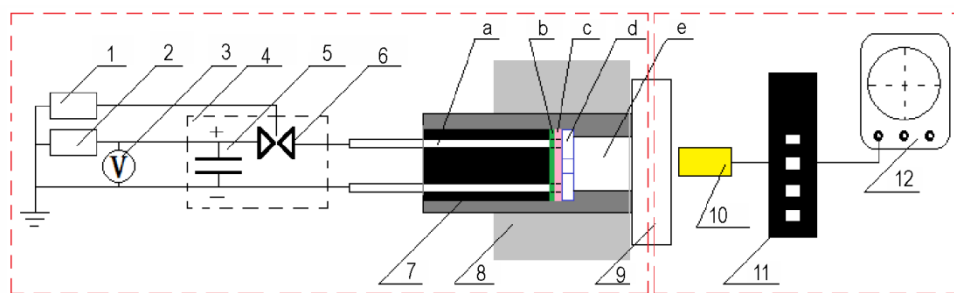


图4 飞片测速试验系统原理图

1—触发电源, 2—高压电源, 3—高压数字表, 4—脉冲功率源, 5—高压脉冲电容器, 6—冷阴极触发管(高压开关), 7—试验样品, 8—固定夹具, 9—载玻片, 10—光纤探头, 11—光子多普勒测速仪, 12—数字示波器, a—电极塞, b—Cu箔, c—聚酰亚胺飞片, d—加速腔, e—飞片速度测试工装腔体

Fig. 4 Schematic diagram of flyer velocity test system

1—trigger power supply, 2—high-voltage DC power supply, 3—high-voltage digital meter, 4—pulse power source, 5—high-voltage pulse capacitor, 6—high-voltage switch, 7—test sample, 8—fixture, 9—slide, 10—fiber probe, 11—PDV, 12—digital oscilloscope, a—electrode plug, b—Cu EF, c—polyimide flyer, d—chamber, e—flyer velocity test fixture cavity

(3) EF飞片速度试验原理及设备

飞片速度测试采用基于多普勒频移和光学混频技术的光子多普勒测速仪(Photonic Doppler Velocimetry, PDV)进行测试,该系统包括 $1550\ \text{nm}$ 半导体激光器、激光放大器、PDV主机和示波器,飞片测速试验原理框图及系统组成如图4所示。

(4) EFI发火性能试验原理及设备

EFI发火性能试验原理如图5所示,电容放电单元(Capacitor Discharge Unit, CDU)放入防护箱中,采用输出电压为 $0\sim 4$ kV,精度为1%的高压直流电源,通过二极管D给CDU中型号规格为CT41L/ $0.22\ \mu\text{F}/3.0$ kV的高压脉冲电容器C充电;采用输出 $0\sim 3$ kV可调脉冲电压、脉冲上升时间不大于 $100\ \text{ns}$ 、脉冲下降时间不大于 $1\ \mu\text{s}$ 的脉冲触发电源为CDU中型号规格为RQ-8001的高压开关S(冷阴极触发管)提供触发信号,在高压开关S闭合瞬间,使高压脉冲电容器C对EFI进行放电,使之起爆。发火感度试验方法采用兰利法进行,刺激上限为 $2200\ \text{V}$,刺激量下限为 $1000\ \text{V}$ 。

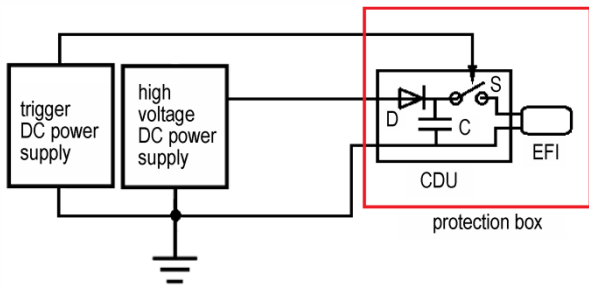


图5 EFI 发火性能试验原理框图

Fig.5 Schematic diagram of EFI firing performance test

2 试验结果及分析

2.1 EF 样品表征

对 150, 450 W 和 800 W 溅射功率条件下制备的 3 种不同晶体形貌 EF 的尺寸、厚度、附着力等进行表征。结果表明, 3 种样品的桥区尺寸均在 $(0.5 \pm 0.1) \text{ mm}(h) \times (0.5 \pm 0.1) \text{ mm}(w) \times (4 \pm 0.2) \mu\text{m}(d)$ 范围内, 每种样品的附着力测试 3 次取平均值, 1# 样品附着力为 42.436 mN, 2# 样品附着力为 55.569 mN, 3# 样品附着力为 71.135 mN。

对不同溅射功率下制备样品的微观组织形貌进行观察, 3 种溅射功率下的 EF 样品在放大 1 万倍的 SEM 图片如图 6a~6c 所示。从图 6a~6c 可以清晰地看出, 1# 样品晶粒尺寸较小, 晶粒稀松, 沉积不均匀, 表面粗

糙, 并且有孔隙和裂纹。随着溅射功率增加, 样品晶粒尺寸逐渐增大, 3# 样品晶粒尺寸相比最大, 且体积大小均匀, 晶粒沉积致密平整, 晶界较少, 与 1# 样品和 2# 样品相比, 无论是在晶粒尺寸大小的均匀性上还是溅射沉积均匀性上, 都有很大改善。图 6d~6f 分别为 1#、2# 和 3# 样品的 AFM 扫描结果图, 数据分析结果显示, 1#、2# 和 3# 样品的表面平均粗糙度分别为 6.7, 16.9 nm 和 46.2 nm, 经计算, 其对应的均方根粗糙度分别为 8.69, 24.61 nm 和 58.69 nm。

采用 XRD 对不同溅射功率制备的 3 种 EF 样品的晶体结构和组成成分进行表征, 得到 XRD 谱图如图 7。图 7 的 XRD 谱中有 Al_2O_3 和 Cu 的特征峰, 没有明显的 CuO 或 Cu_xO 特征峰, 说明 Cu 箔在制备时未被氧化。在 2θ 值为 43.7° 时存在 $\text{Cu}(111)$ 晶面的强衍射峰, 且 3# 样品中 $\text{Cu}(111)$ 晶面的衍射峰最高。根据样品的 XRD 图谱, 利用数据分析软件 Jade 6.0 结合谢乐公式^[19-20], 计算出 1# 样品的平均晶粒尺寸为 19.6~36.7 nm, 2# 样品的平均晶粒尺寸为 41.5~62.9 nm, 3# 样品的平均晶粒尺寸为 58.6~80.2 nm。

2.2 EF 电爆炸性能

定义高压脉冲电容器输入充电电压 U_{SB} , 在高压开关闭合时, 金属桥箔两端电压曲线 $U(t)$ 通过并联的高压探头测出, 罗氏线圈记录放电回路电流 $I(t)$, 通过

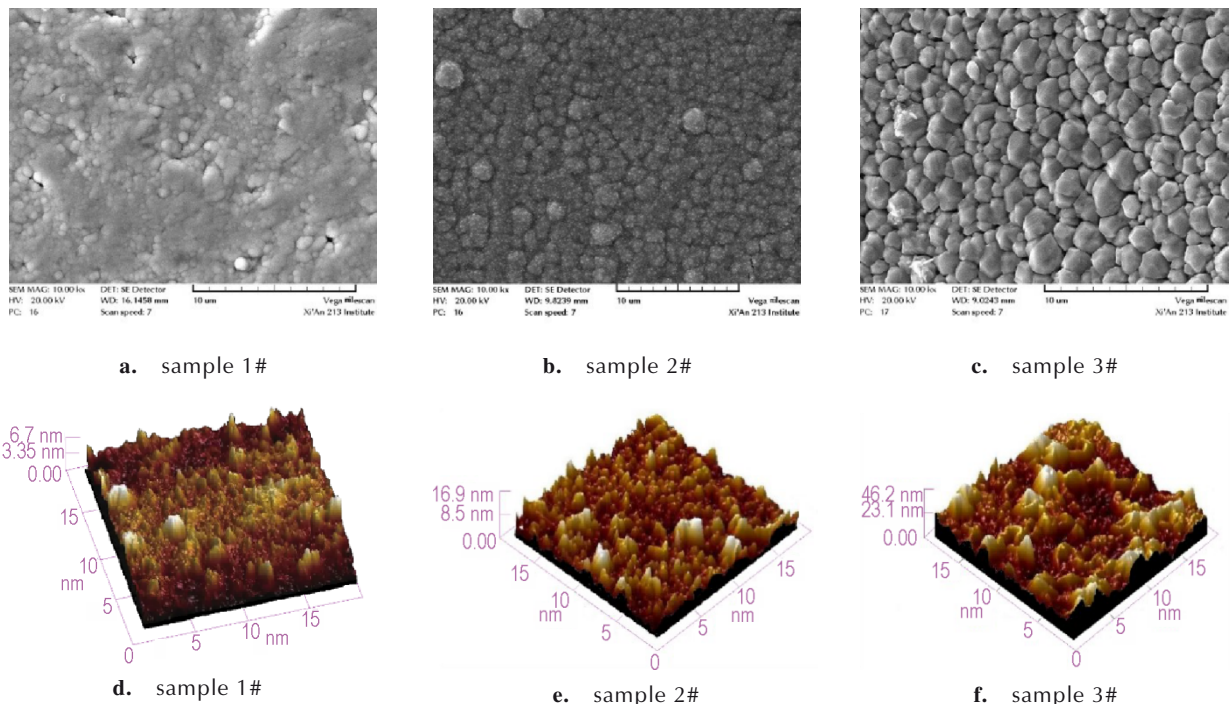


图6 EF的SEM图(MAG=10.00 kx)和EF的AFM图

Fig.6 SEM images of EF (MAG=10.00 kx) and AFM images of EF samples

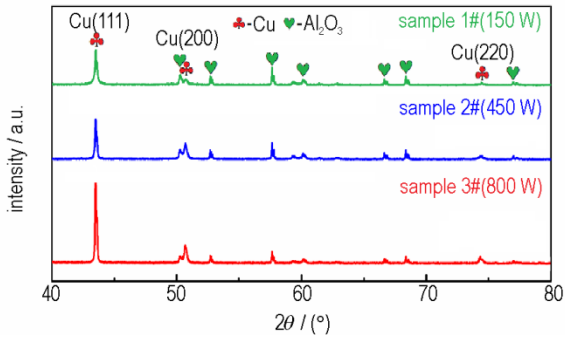


图7 EF的XRD谱图

Fig.7 XRD spectrum of EF samples

$U(t)$ 和 $I(t)$ 曲线,可以获得金属桥箔电爆炸时的性能参数(峰值电流 I_p 、峰值电流时间 t_p 、爆发时间 t_b 、爆发电压 U_b 、爆发电流 I_b)。电容放电电流曲线 $I(t)$ 峰值的对应点即峰值电流 I_p ,对应的时间为峰值电流时间 t_p ,电压曲线 $U(t)$ 峰值的对应点为金属桥箔的电爆炸时刻为爆发时间 t_b ,该点对应的电压值 U_b 为爆发电压,对应的电流值为爆发电流 I_b 。金属桥箔电爆炸时通过桥区的爆发电流密度 ρ_b 、爆发点峰值功率值 P_b ,金属桥箔在电爆炸过程中沉积的能量 E_f (mJ),能量利用效率 η ,峰值电流时间与爆发时间的时差 Δt 计算公式如式(1)~(6)^[21-23]。Cu箔电爆炸曲线如图8所示,3种样品在充电电压 U_{SB} 分别为1300,1500,1800,2000,2200 V电爆炸测试数据如表1所示。

$$\rho_b = \frac{I_b}{h \times w \times d} \quad (1)$$

$$P_b = U_b \times I_b \quad (2)$$

$$E_f = \int_0^{t_b} U(t) \cdot I(t) dt = \int_0^{t_b} P(t) \quad (3)$$

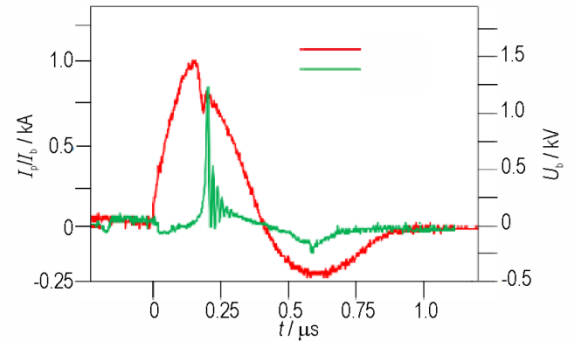
$$E_{in} = \frac{1}{2} C U_{SB}^2 \quad (4)$$

$$\eta = \frac{E_f}{E_{in}} \quad (5)$$

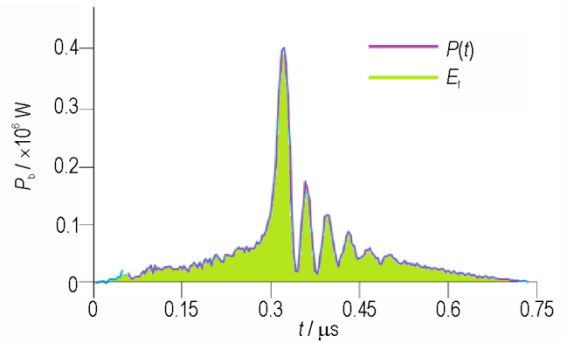
$$\Delta t = t_p - t_b \quad (6)$$

式(1)~(6)中, ρ_b 为爆发电流密度, $MA \cdot cm^{-3}$; I_b 为爆发电流,A; h, w, d 分别为Cu箔的长、宽和厚度,分别为0.5 mm,0.5 mm和4 μm ; P_b 为爆发点峰值功率,MW; U_b 为爆发电压,kV; I_b 为爆发电流,kA; E_f 为沉积的能量,mJ; t_b 为爆发时间,ns; E_{in} 为输入总能量,mJ; C 为高压电容器电容容量,为0.22 μF ; U_{SB} 为电容器充电电压,V; η 为能量利用率,%; Δt 为峰值电流与爆发电流时间差,ns; t_p 为峰值电流时间,ns。

如表1所示,在相同充电电压下,3#样品的爆发电压 U_b 、峰值电流 I_p 和爆发电流 I_b 均为最大,其次为2#



a. voltage and current histories of Cu foil during the electrical explosion process



b. electrical explosion power-time curve and energy area spectrum

图8 Cu箔电爆炸性能曲线

Fig.8 Cu foil electrical explosion performance curve

表1 Cu箔电爆炸测试数据

Table 1 Electrical explosion parameters of Cu foil

U_{SB} /V	samples	R /m Ω	L /nH	U_b /V	t_b /ns	I_p /A	I_b /A	t_p /ns
1300	1#	41.7	33.7	1030	288	1020	860	241
	2#	36.3	28.1	1140	261	1130	940	236
	3#	31.2	22.6	1190	260	1180	1020	246
1500	1#	42.4	34.9	1240	269	1130	930	233
	2#	33.8	30.1	1360	252	1210	1190	226
	3#	30.9	20.2	1400	241	1320	1340	230
1800	1#	39.8	36.1	1530	237	1490	1410	226
	2#	36.1	28.9	1580	221	1620	1620	219
	3#	30.5	21.3	1660	209	1710	1700	212
2000	1#	44.1	30.6	1680	224	1640	1640	223
	2#	34.6	24.8	1780	210	1790	1780	207
	3#	31.8	21.9	1830	209	1860	1860	214
2200	1#	40.6	34.6	1790	221	1810	1800	229
	2#	36.1	27.4	1920	207	1930	1930	210
	3#	32.9	21.8	2010	211	2020	2020	204

Note: R is resistance. L is inductance. U_b is burst voltage. t_b is burst time. I_p is peak current. I_b is burst current. t_p is peak current time.

样品,1#样品最小,这是由于Cu箔晶体形貌导致制备的3种样品电阻值和电感值有较大差异,1#样品的电阻和电感最大,2#样品次之,3#样品最小。金属电阻率计算方法如式(7),从公式(7)可知,相同厚度的Cu箔其电阻率 $\rho \propto R$ 电阻阻值。金属的电阻率是由其纯度、密度和晶体结构决定的。Cu箔是多晶结构,晶粒越大,密度越小,并且晶粒大小越均匀,晶界范围就越小,电阻率就越小,其晶界数量将极大地影响Cu的电阻率和电阻值,而Cu箔的电阻值也会影响到其电感量,电阻值越大,电感量也会提高,故1#样品的电阻值和电感值最大,2#次之,3#最小,其测试数据如表1所示。

$$\rho = R \frac{d}{F} \quad (7)$$

式中, ρ 为电阻率, $\text{m}\Omega \cdot \text{mm}$; R 为电阻, $\text{m}\Omega$; d 为薄膜厚度, μm ; F 为无因次化几何因子,与样品的厚度、面积、位置和中间层材料均有关。

如表1所示,当 U_{SB} 低于1800 V时,3#样品的爆发时间与峰值时间最接近,1#样品的爆发时间均大于峰值时间;随着 U_{SB} 不断升高,3种样品的爆发时间与峰值时间几乎重合。对表1中的数据按照式(1)~(6)进行计算,得到3种样品的电爆炸能量及功率数据如表2所示。在充电电压 U_{SB} 为1300,1500,1800,2000 V和2200 V时,3#样品的能量利用率比2#样品分别高16.4%,26.4%,21.2%,17.5%,15.5%,比1#样品高43.6%,62.9%,69.1%,68.5%,64.1%。上述结果说明,Cu箔表面晶粒沉积越均匀、晶粒颗粒大小越均匀,致密性越好,附着力越紧密,制备的桥箔电阻值和电感值越小,其电爆炸能量利用率越高。

2.3 EF飞片速度

基于上述制备的3种EF样品,采用厚度为25 μm 的聚酰亚胺飞片组装EF换能组件进行飞片速度测试,经测试,1#、2#和3#样品在1800 V/0.22 μF 条件下的飞片

表2 Cu箔电爆炸计算数据

Table 2 Calculated data on electrical explosion of Cu foil

U_{SB} /V	samples	ρ_b /MA·cm ⁻³	P_b /MW	E_i /mJ	E_{in} /mJ	η	Δt /ns
1300	1#	860	0.8858	0.06		32.1%	-47
	2#	940	1.0716	0.07	0.186	39.6%	-25
	3#	1020	1.2138	0.09		46.1%	-14
1500	1#	930	1.1532	0.09		36.7%	-36
	2#	1190	1.6184	0.12	0.248	47.3%	-26
	3#	1340	1.876	0.15		59.8%	-11
1800	1#	1410	2.1573	0.14		39.2%	-11
	2#	1620	2.5596	0.19	0.356	54.7%	-2
	3#	1700	2.822	0.24		66.3%	3
2000	1#	1640	2.7552	0.18		40.6%	-1
	2#	1780	3.1684	0.26	0.440	58.2%	-3
	3#	1860	3.4038	0.31		68.4%	5
2200	1#	1800	3.222	0.23		43.2%	8
	2#	1930	3.7056	0.33	0.532	61.4%	3
	3#	2020	4.0602	0.38		70.9%	-7

Note: ρ_b is burst current density. P_b is Burst point peak power. E_i is bridge foil deposition energy. E_{in} is input energy. η is energy efficiency. Δt is time difference between peak current and burst current.

速度 v_f 分别为2144,2917 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和3269 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,飞片速度曲线如图9所示。不同溅射功率下的3种样品,在充电电压 U_{SB} 分别为1300,1500,1800,2000,2200 V时,电爆后飞片速度 v_f 试验结果曲线如图10所示。

由图9和图10可以看出,随着充电电压增加,爆炸箔单位时间内产生更多焦耳热,导致物相转变速率加快,从而提高感应电压、增强等离子体输出性能,最终大幅提高飞片速度;在相同 U_{SB} 下,1#样品的飞片速度最小,其次是2#样品,3#样品的飞片速度最大,说明Cu箔的附着力和晶粒颗粒大小的均匀性对飞片速度影响较大,Cu箔晶粒颗粒大小越均匀,致密性越好,附着力越紧密,越有利于Cu箔发生电爆炸,并且电爆炸

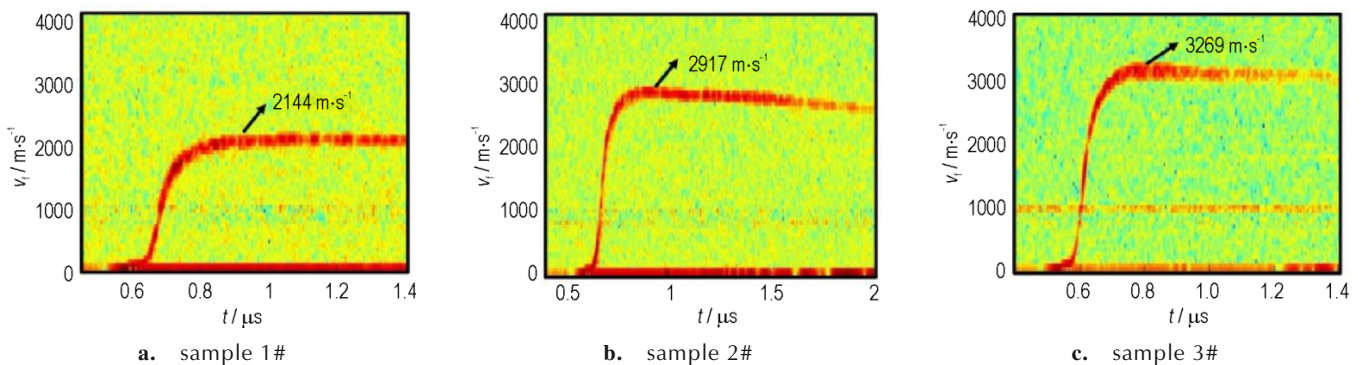


图9 飞片速度曲线

Fig.9 Flyer velocity-time curves

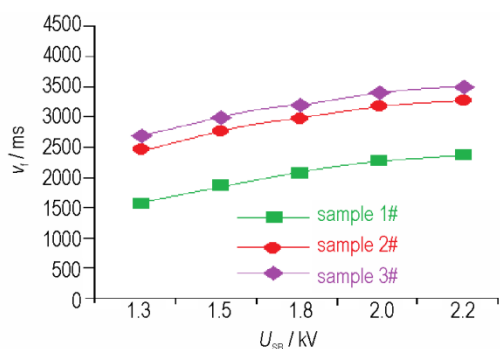


图10 3种样品不同驱动电压下的飞片速度

Fig.10 Flyer velocity of the three samples at different discharge voltages

过程中能量利用率越高,其发生电爆炸时形成的飞片速度越高。

Cu箔的晶体结构与溅射功率有很大关系,其中溅射速率表达式如式(8),随着溅射工作条件的改变,金属粒子会有不同的表面扩散、体扩散以及原子遮蔽效应,因而形成不同的微观结构。由于设备控制的溅射功率不同,会影响Cu粒子的扩散,使其撞击Cu箔表面形成凹陷形貌,同时也会使Cu原子来不及横向扩散产生大量的纵向堆积。在溅射功率较小时,Cu箔晶体形状不规则,晶粒大小不均匀,晶界数量大幅增加,晶界电阻增加;随着溅射功率和速率的不断提升,溅射Cu箔晶粒越大,且大小越均匀,致密性越好,晶界范围越小,电阻率就越小,晶粒尺寸越大,其表面粗糙度越大,附着力越强,在窄脉冲大能量驱动下,越有利于发生电爆炸反应,并且发生电爆炸产生的等离子体越多,剪切飞片能力越强,形成的飞片速度越高,越有利于能量转换。

$$S = \frac{3a}{4\pi^2} \frac{4m_i m_t E}{m_i + m_t U_0} \quad (8)$$

式中, E 为入射离子能量,mJ; m_i 为入射离子质量,amu; m_t 为改变的离子质量,amu; U_0 为靶材表面建和能,mJ·m⁻²;a为0.7~1.4。

2.4 EFI发火性能

采用兰立法分别对1#、2#和3#EF制备的EFI(A,B,C)进行发火感度试验,数据如表3所示。

如表3所示,采用不同功率溅射的1#、2#和3#EF样品,对应制备的3种EFI(A,B,C)的50%发火电压 $U(50\%)$ 分别为1538,1493 V和1254 V,标准偏差分别为54,46 V和39 V,3#样品的50%发火感度比2#和1#样品的高19.1%和22.6%。发火性能试验结果表明,Cu箔的沉积越均匀,晶粒尺寸大小越均匀,致密性越好,附着力越紧密,其发火能量越低,感度越高,试验结果与上文不同晶体微观形貌的EF电爆能量利用率和飞片速度规律一致,这是由于在EFI作用过程中,从电能转换成电爆炸等离子体能,再从等离子体能转换为飞片动能,其能量转换界面较多,故EFI的发火感度与EF的电爆炸能量利用率和飞片速度有直接关系。爆炸后的EFI残渣如图11a,采用闪光X射线拍摄的

表3 冲击片雷管感度测试结果

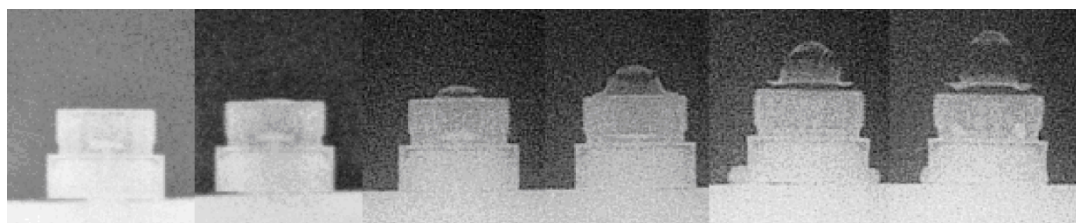
Tab.3 Firing sensitivity of the EFIs

samples	$U(50\%) / V$	standard deviation / V
A	1538	54
B	1493	46
C	1254	39

Note: $U(50\%)$ is the 50% ignition voltage sensitivity.



a. residues of EFI after explosion



b. X-ray photographs during ignition process of the EFI sample

图11 EFI发火试验表征

Fig.11 Photoes of EFI firing test

EFI作用过程如图11b所示。

从图11a可以看出,作用后的EFI管壳破裂并且形成残渣,足以证明其完全发火,这是由于EFI在发火后其输出端的装药已经完全爆炸,致使EFI输出端的管壳已经破碎并且发生形变。从图11b的EFI作用过程可以看出,EFI在发火后其外部主要是从管壳底部首先发生形变以及破裂,最终形成破片。

3 结论

采用闭合场非平衡磁控溅射离子镀技术和 Lift-Off 刻蚀工艺,在 150, 450 W 和 800 W 的磁控溅射功率下制备了 3 种不同晶体微观形貌的 Cu EF 和 EFI,利用 SEM、AFM 和 XRD 表征了 EF 微观结构和组成成分,对其电爆性能、飞片速度以及 EFI 的发火性能进行了试验研究,可以得出以下结论。

(1) 溅射功率为 800 W 时制备的 EF 晶粒尺寸最大且分布最均匀,晶粒沉积致密平整,晶界较少,平均晶粒尺寸和表面平均粗糙度最大,分别为 58.6~80.2 nm 和 46.2 nm,附着力最强为 71.135 mN, Cu(1 1 1) 晶面的衍射峰最高。

(2) 溅射功率为 800 W 时制备的 EF 电阻值和电感值最小,电爆炸能量利用率最高,在充电电压 U_{sb} 为 1300, 1500, 1800, 2000 V 和 2200 V 时,电爆炸的能量利用率比溅射功率为 450 W 的高 16.4%, 26.4%, 21.2%, 17.5%, 15.5%, 比溅射功率为 150 W 的高 43.6%, 62.9%, 69.1%, 68.5%, 64.1%。

(3) 在溅射功率为 800 W 时制备的 EF,电爆炸形成的飞片速度最高,在 1800 V/0.22 μ F 条件下的飞片速度 v_f 高达 3269 $m \cdot s^{-1}$,越有利于能量转换。

(4) 溅射功率为 800 W 制备对应 EFI 的 50% 发火电压和标准差最低,分别为 1254 V 和 39 V,比溅射功率 450 W 和 150 W 制备的 EFI 50% 发火感度高 19.1% 和 22.6%。

参考文献:

- [1] 周密,张晶鑫,同红海,等. Cu箔厚度对爆炸箔起爆性能影响规律研究[J]. 火工品, 2019, 04: 14-8.
ZHOU Mi, ZHANG Jin-xin, TONG Hong-hai, et al. Study on the effect of copper foil thickness on detonation performance of explosive foil initiator[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2019, 04: 14-8.
- [2] 张彬,任炜,褚恩义,等. 不同桥形微结构换能元的仿真设计与实验研究[J]. 含能材料, 2018, 26(12): 1056-1060.
ZHANG Bin, REN Wei, CHU En-yi, et al. Simulation design and experimental study for microstructure energy conversion components with different bridge shapes[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(12): 1056-1060.
- [3] 钱勇,褚恩义,谢高第,等. 3种爆炸箔桥形状的比较分析[J]. 兵工学报, 2009, 30(2): 217-220.
QIAN Yong, CHU En-yi, XIE Gao-di, et al. The optimization design of exploding foil bridge shape[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(2): 217-220.
- [4] 周密,钱勇,刘燕,等. 爆炸箔起爆器桥箔夹角优化设计[J]. 含能材料, 2012, 20(1): 109-112.
ZHOU Mi, QIAN Yong, LIU Yan, et al. Optimal design of foil bridge included angle of exploding foil initiator[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(1): 109-112.
- [5] 周密,张晶鑫,同红海,等. Cu箔厚度对爆炸箔起爆性能影响规律研究[J]. 火工品, 2019, 04: 14-18.
ZHOU Mi, ZHANG Jin-xin, TONG Hong-hai, et al. Study on the effect of copper foil thickness on detonation performance of explosive foil initiator[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2019, 04: 14-18.
- [6] 李艺,周庆,王窈. 爆炸箔桥翼形状对电爆特性及飞片速度影响研究[J]. 火工品, 2020, (4): 16-18.
LI Yi, ZHOU Qing, WANG Yao. Study on electrical characteristics and flyer velocity of exploding foil with different foil wing shapes[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2020, 04: 16-18.
- [7] 冯长根,伍俊英,陈朗,等. 桥箔电爆炸过程数值计算分析[J]. 含能材料, 2004, 12: 484-487.
FENG Chang-gen, WU Jun-ying, CHEN Lang, et al. Numerical simulation of the electrical explosion of exploding foils[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12: 484-487.
- [8] 吕栋腾,韩克华. 金属Cu箔和Al箔的制备及其电爆性能研究[J]. 火工品, 2019(3): 5-9.
LU Dong-teng, HAN Ke-hua. Preparation and exploding performance of Cu foil and Al foil[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2019, (3): 5-9.
- [9] 杨爽,孙秀娟,王万军,等. Ni/Cu复合多层膜电爆炸等离子体发射光谱特性及飞片推动性能[J]. 含能材料, 2019, 27(6): 456-464.
YANG Shuang, SUN Xiu-juan, WANG Wan-jun, et al. Plasma spectrograph and driving flyer properties of electrically exploded ni/cu multilayers[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(6): 456-464.
- [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, 03: 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, 03: 5-8.
- [11] 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.
- [12] BARRON S, WEIHS T P, WILKINS P, et al. Rapid initiation of reactions in Al/Ni multilayers with nanoscale layering[J]. *The Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2010, 71(2): 84-89.

- [13] 郭菲,付秋波,王窈,等.不同制造工艺Cu箔电爆驱动飞片能力[J].含能材料,2015,23(8):787-790.
GUO Fei, FU Qiu-bo, WANG Yao, et al. Effects of fabrication process on drive capability of flyer with copper bridge foil [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(8): 787-790.
- [14] 胡云钦,邱林俊,代波,等.磁控溅射Cu薄膜微观结构对其电爆性能的影响[J].功能材料,2016,47(12):12152-12156.
HU Yun-qin, QIU Lin-jun, DAI Bo, et al. Effects of micro-structure of Cu thin films deposited by magnetron sputtering on electro-explosive performance [J]. *Jorunal of Functional Materials*, 2016, 47(12): 12152-12156.
- [15] HABERLAND H, INSEPOV Z, MOSELER M. Molecular-dynamics simulation of thin-film growth by energetic cluster impact [J]. *Physical Review B*, 1995, 51 (16) : 11061-11067.
- [16] WINAU D, KOCH R, FUHRMANN A, et al. Film growth studies with intrinsic stress measurement: Polycrystalline and epitaxial Ag, Cu, and Au films on mica(001)[J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 70(6):3081-3087.
- [17] HAFTEL M I, ROSEN M, FRANKLIN T, et al. Molecular-dynamics investigation of early film growth of Pt/Au (100) and Au/Pt (100) and an interdiffusive growth mode [J]. *Physical Review B, Condensed matter*, 1996, 53(12): 8007-8014.
- [18] JR T J Y. An investigation of clustering during the early stages of sculptured thin film growth via molecular dynamics [D]. *Dissertation Abstracts International*, Volume: 67-02, Section: B, page: 1102. Advisers: Gary Gray; Fr, 2005.
- [19] 吴万国,丁音琴,黄清明.纳米材料晶粒鉴定方法的研究[J].福州大学学报(自然科学版),2003,31(1):49-51.
WU Wan-guo, DING Yin-qin, HUANG Qing-ming. Study on the method of grain identification of nanomaterials [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2003, 31(1): 49-51.
- [20] 戴超华,成震今,周君儒.全谱拟合法与谢乐公式计算铂纳米晶粒尺寸探讨[J].冶金分析,2022,42(12):5.
DAI Chao-hua, CHENG Zhen-jin, ZHOU Jun-ru. Exploration of full-spectrum fitting method and Scheele's formula for calculating Pt nanograin size [J]. *Metallurgical Analysis*, 2022, 42(12):5.
- [21] 韩克华,周俊,任西,等.高压脉冲功率源等效参数对桥箔电爆性能影响规律[J].含能材料,2014,22(6):828-833.
HAN Ke-hua, ZHOU Jun, REN Xi, et al. Effect of high voltage pulse power source equivalent parameter on exploding performance of foil bridge [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(6): 828-833.
- [22] 韩克华,任西,秦国圣,等.高压脉冲功率源输出特性[J].探测与控制学报,2012,34(4):24-29.
HAN Ke-hua, REN Xi, QIN Guo-sheng, et al. Output performance of high voltage pulse power source [J]. *Journal of Detection & Control*, 2012, 34(4): 24-29.
- [23] 韩克华,王丽萍,任西,等.高压脉冲功率源与冲击片雷管发火能量匹配关系特性试验方法[J].火工品,2012(3):45-49.
HAN Ke-hua, WANG Li-ping, REN Xi, et al. Study on the test method of initiation energy matching for high voltage pulse power source and slapper [J]. *INITIATORS & PYROTECHNICS*, 2012 (3):45-49.

Effect of Micro Morphology and Crystal Structure of Copper Foil on the Performance of Exploding Foil Initiator

HAN Ke-hua^{1,2}, ZENG Xin¹, ZHAO Wan-jun¹, CHU En-yi², JIAO Qing-jie¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to explore the effect of microstructure and crystal organization of copper (Cu) foil on the performance of exploding foil initiator (EFI), three Cu foils with different crystal morphologies were prepared through the closed-field non-equilibrium magnetron sputtering ion plating technique and Lift-Off etching method under the sputtering power of 150, 450 W and 800 W. Experimental characterizations of the electrical explosion performance and flyer velocity of exploding foil (EF), and the ignition performance of EFI were conducted subsequently. Average grain size of the samples fabricated at 150, 450 W and 800 W are 19.6-36.7nm, 41.5-62.9 nm and 58.6-80.2 nm, surface average roughness are in turn 6.7, 16.9 nm and 46.2 nm, and the adhesion force are 42.436, 55.569 mN, and 71.135 mN, respectively. Of which, the Cu foil prepared at 800 W exhibits the largest and the most uniform grain size, the densest and smoothest grain, the fewest grain boundaries, the largest surface roughness and the strongest adhesion force. The corresponding EF has the smallest resistance and inductance, highest energy conversion efficiency and flyer velocity. The 50% firing sensitivity of the integrating EFI sputtered at 800 W are 19.1% and 22.6% higher than the samples sputtered at 450 W and 150 W, respectively.

Key words: exploding foil initiator; Cu foil; micro morphology; electrical explosion; flyer velocity; ignition performance

CLC number: TJ45

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023037

Grant support: National "14th Five-Year Plan" Basic Research Project(No. 90903050301)

(责编:王馨逸)