

文章编号: 1006-9941(2014)04-0514-07

冲击片雷管爆炸箔的制备与电爆性能

黄娜¹, 唐洪佩², 黄寅生¹, 何义¹

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 广东宏大爆破股份有限公司, 广东 广州 510623)

摘要: 为了提高爆炸箔起爆系统的能量利用率, 采用闭合场非平衡磁控溅射离子镀技术和皮秒激光微加工系统, 制备了 Cu、Cu/Au、Cu/Al/Ni 三种爆炸箔, 并利用自制起爆回路对其电爆性能进行了研究, 结果表明, 在充电电压为 2000, 2500 V 时, Cu 爆炸箔在电爆过程中能量利用率较高; 在此电压下对三种爆炸箔的性能进行了对比测试, 得到在相同的充电电压下 Cu/Al/Ni、Cu/Au、Cu 爆炸箔的爆发电流 $Cu/Al/Ni > Cu/Au > Cu$, 且充电电压为 2500 V 时 Cu/Al/Ni 爆发电流比 Cu 增长了 36%, 2000 V 下比 Cu 增长了 15%; 在充电电压 2500 V 时利用高速摄影法对三种爆炸箔电爆时产生的等离子体羽进行了观测, 结果表明, 等离子体羽的尺寸 $Cu/Al/Ni > Cu/Au > Cu$ 。在相同的起爆条件下 Cu/Al/Ni 爆炸箔更利于爆炸箔起爆系统低能化研究

关键词: 军事化学与烟火技术; 冲击片雷管; 磁控溅射; 激光微加工; 电爆性能

中图分类号: TJ45; E913

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.04.017

1 引言

冲击片雷管的发展已有 40 多年的历史, 但是起爆系统较大的体积制约了其在常规武器系统上的应用, 因此, 各国竞相开展了爆炸箔起爆系统 (exploding foil initiator system, EFIS) 低能化、小型化研究, 以实现低的发火能量和 EFIS 的高度集成化。提高冲击片雷管的能量利用率是低能化的重要途径, 对 EFIS 的小型化研究也具有一定指导作用^[1]。爆炸箔作为冲击片雷管的核心部件之一, 在系统中起重要的换能元件的作用, 它的材料、形状、厚度及桥区尺寸对 EFIS 的能量利用率都有影响。国内在爆炸箔的参数设计方面做了大量的工作^[2-4], 得到了桥区形状、尺寸、厚度等参数在特定起爆装置下的最优匹配值, 但关于爆炸箔材料的选用研究比较少。而箔材料的比热、汽化热、以及密度都会影响爆炸特性, 因此, 对爆炸箔材料的研究很有意义。2004 年冯长根^[5]采用 Lee 提出的 FIRESET 模型, 对 Cu、Au、Al、Au-Pt 合金四种爆炸箔电爆炸过程进行数值模拟, 得出了在相同的起爆和爆炸箔几何

参数的条件下, Cu、Au 桥箔的爆发电流密度较大, 能量利用率高, Al 次之, Au-Pt 合金最小。近几年来, 由于 Al/Ni 金属复合含能薄膜能够发生自蔓延反应, 同时又具有优良的导电、导热性能, 形成的金属间化合物具有较高的熔点、较低的密度和抗氧化等特性, 有可能成为一类新型的含能桥膜材料, 受到了国外研究人员的重视。2010 年, 美国 AMSRD-ARL-SE-RL 军方实验室^[6]在 Cu 箔基础上溅射了不同调制周期、不同厚度的纳米级 Al/Ni 多层复合膜用于快速起爆反应, 发现其在高压、大电流的作用下 100ns 内能将电能转化为速度为 $2 \sim 6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 飞片动能, 认为 Al/Ni 的合金化反应对提高动能确有作用。2012 年, 南京理工大学的周翔^[7]研究了 Al/CuO 复合膜应用于冲击片雷管的可行性, 得到了添加复合膜后的 Cu 爆炸箔, 对其电爆性能和飞片速度进行了测试, 结果其驱动飞片所达到的平均速度较之单纯 Cu 爆炸箔并无明显提升。鉴于金属 Au、纳米级 Al/Ni 多层复合膜在电爆炸方面的优良性能, 将其用附加到传统的冲击片雷管的 Cu 爆炸箔上, 望其能提高其能量利用率, 实现爆炸箔的能量倍增。为此本研究结合微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) 火工技术制作 Cu、Cu/Au、Cu/Al/Ni 三种爆炸箔, 并对其电爆性能进行比较, 研究其膜材料不同对冲击片雷管起爆电流的影响, 优选出能量利用率高的爆炸箔。

收稿日期: 2013-07-10; 修回日期: 2014-01-12

基金项目: 国防预研基金 (51305100202)

作者简介: 黄娜 (1988-), 女, 在读硕士, 主要从事火工品冲击片雷管设计研究。e-mail: huangna1017@126.com

通信联系人: 黄寅生 (1962-), 男, 教授, 主要从事含能材料的点火与起爆技术的研究。e-mail: huangyinsheng@sina.com

2 爆炸箔样品制备

冲击片雷管的爆炸箔制样采用闭合场非平衡磁控溅射离子镀技术和皮秒激光微加工系统共同加工完成。实验选用 99Al₂O₃ 陶瓷基片作为反射片,其规格为 200 mm×100 mm×0.6 mm。镀膜前分别用丙酮和去离子水超声清洗 15 min 后,在空气中吹干放入 110 °C 烘箱中,烘烤 30 min 后放入洁净的基片袋中备用。本实验所使用镀膜沉积设备为英国 Teer 公司生产的 UDP450 型闭合场非平衡磁控溅射镀膜机,它由真空系统、电源系统、控制系统、冷却系统四部分组成。使用 Advanced Energy 公司的 Pinnacle 直流电源电离 Ar 气对尺寸为 330 mm×134 mm×12 mm 的高纯度 99.99% 的金属靶材进行溅射,真空腔内起始真空度为 8×10⁻³Torr,镀层沉积前先以 -350 V 偏压对基片清洗 10 min,而后设定各磁控阴极的靶电流均为 1 A,基片偏压 -70 V,此时工作气压为 0.8 Pa。根据前期的试验已得到各个金属的成膜速率(表 1)和设计的爆炸箔的厚度(Cu 爆炸箔 5 μm,Cu/Au 爆炸箔为 4 μm Cu-1 μm Au,Cu/Al/Ni 爆炸箔为 4 μm Cu-0.3 μm Al-0.2 μm Ni)开始沉积。镀膜过程中需保持试样以 5 r·min⁻¹ 的速度绕中心轴顺时针旋转。

表 1 金属膜的成膜速率

Table 1 Rate of the metal film formation

membrane material	flow rate of argon gas /sccm	sputtering pressure /MPa	sputtering power /W	average rate of deposition /nm·min ⁻¹
Cu	12	7×10 ⁻⁴	400	36
Au	12	8×10 ⁻⁴	220	30
Al	10	8×10 ⁻⁴	350	30
Ni	10	8×10 ⁻⁴	300	45

爆炸箔桥形的刻蚀采用德国 Super-Dmirco650 超快皮秒激光微加工系统进行金属膜的激光刻蚀,Super-Driling 600F 激光微切割钻孔系统进行陶瓷基板的打孔切割,得到的样品如图 1 所示。

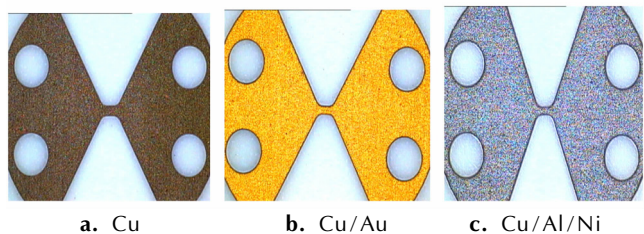
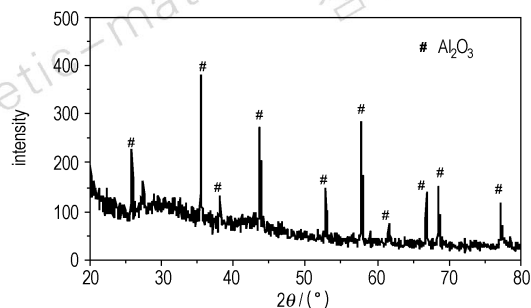


图 1 显微镜下爆炸箔的样品图

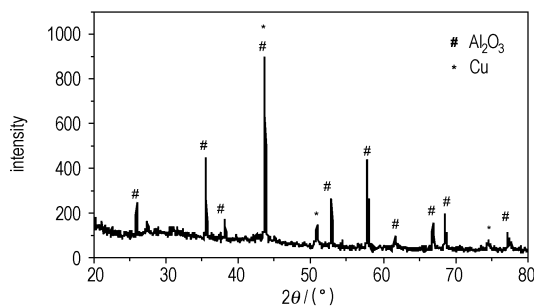
Fig.1 Sample figures of exploding foils under the microscope

3 爆炸箔样品表征

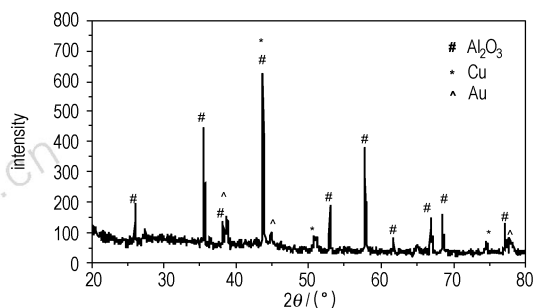
利用德国布鲁克公司生产的 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪,对所制备的不同种类的爆炸箔进行 20°~80°扫描检测,得到衍射谱图。由 XRD 谱(图 2)可以看出存在 Al₂O₃、Cu、Au 等特征峰,检测中没有明显



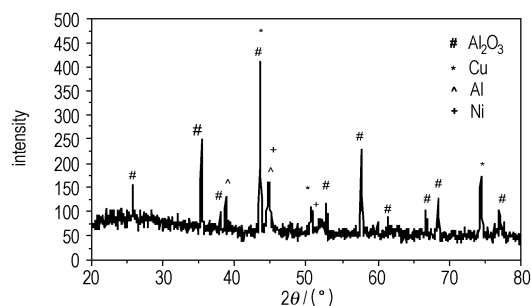
a. ceramic substrate



b. Cu exploding foil



c. Cu/Au exploding foil



d. Cu/Al/Ni exploding foil

图 2 不同种类的爆炸箔的 XRD 图

Fig.2 XRD figures of different exploding foils

的 CuO 或 Cu_xO 等特征峰, 这说明 Cu 膜在制备时几乎未被氧化。在 Cu/Al/Ni 爆炸箔中, 由文献[8]可知 Al/Ni 合金复合膜中, 预混层厚度只有几个纳米, 当复合膜调制周期很小 Al 膜单层厚度 < 200 nm 时, Al 峰不易检测到, 所以本研究将 Al/Ni 复合膜调制周期调整为 1 μm , 又根据薄膜金属反应热表[9]可以发现 $Al+Ni \rightarrow AlNi$ 时放热量相对较高, 结合金属 Al、Ni 的相对原子序数可以得到 Al、Ni 调制比应为 3 : 2, 则 Al 膜单层厚度为 300 nm, Ni 膜单层厚度为 200 nm, 这样可观测到明显的 Al、Ni 特征峰。又因 99 氧化铝陶瓷基片在制备过程中添加了其他微量元素, 所以在 25° 附近出现了一峰, 在各种爆炸箔检测中均有出现, 并非杂质峰。

4 爆炸箔电爆实验

4.1 实验装置

实验装置如图 3 所示。主要由三部分组成: 高压电源、电容器和真空火花隙开关组成的高压脉冲功率源部分; 爆炸箔样品起爆装置部分; 示波器、电压电流信号采集器及高速摄影仪等组成信号采集观测部分。实验中所用的高压电源由天津市微模电源科技有限公司提供的 WMHT45B 型高压源, 可提供 0 ~ 4000 V 高压, 为电容器 (0.22 μF) 充电以及为真空开关提供脉冲高压, 电爆性能测试时采用 Lecroy 高压探头测试爆炸箔两端的电压变化, 罗果夫斯基线圈测量回路的电流变化, 所得电压、电流信号用 Lecroy44Xs 示波器记录存储, 并用高速摄影仪 REDLAKE HG-100K 观察爆炸箔电爆现象。

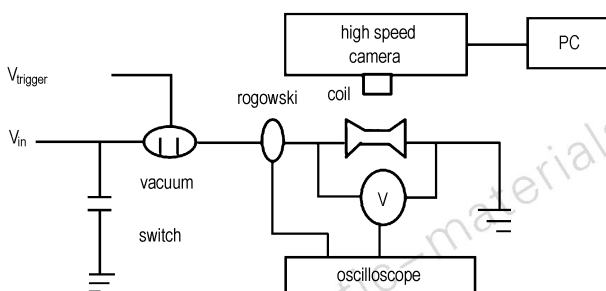


图 3 电爆装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of electro explosive device

4.2 起爆回路电阻、电感测试

在爆炸箔电爆实验中, 由于高压脉冲功率源能量输出较大, 各元器件经常被损坏, 耗费较大。为了保护起爆装置, 节约试验成本, 在高压脉冲功率源输出端与爆炸箔样品起爆装置部分之间增加引出了电缆。然而, 由于高压脉冲功率源的输出特性与起爆回路的等效电感、

等效电阻有很大关系[10], 增加引出电缆将会使起爆回路的总电感和总电阻增加, 降低了脉冲功率源的输出能量。为此, 需要对起爆回路的电感、电阻进行测试。

根据美军标 MIL-DTL-23659D, 脉冲功率源在短路放电时, 电流应至少包含 5 个等间隔减幅振荡波形。在测试中, 用一个低阻短接线路代替爆炸箔, 按正常方法操作, 同时监测电流, 得到充电电压在 3000 V 时, 起爆回路电流曲线图 4。

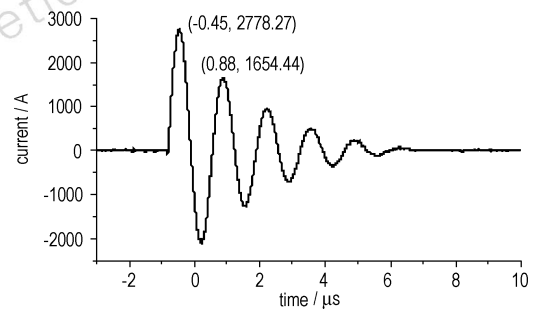


图 4 充电电压 3000 V 时起爆回路短路电流曲线

Fig. 4 Detonating circuit short-circuit current curve at charging voltage of 3000 V

由串联 R-L-C 电路放电理论推导出来计算公式[11]:

$$L = \frac{T^2}{C} \times \left\{ 4\pi^2 + \left[\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \right]^2 \right\}^{-1} \quad (1)$$

$$R = \frac{2L}{T} \times \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (2)$$

式中, T 是电流曲线的振荡周期, μs ; I_1 、 I_2 是最开始两个正向电流峰值, A; L , 电感, nH; C , 电容, μF 。

由图 4 可读出 $I_1 = 2778.27$ A, $I_2 = 1654.44$ A, $T = 1.33$ μs 分别带入公式 (1)、(2), 得到起爆回路的总电感为 203 nH, 电阻为 158 m Ω 。其中, 需要说明的是起爆回路的电阻电感值比较大, 究其原因可能是因为试验中引出了较长的电缆的缘故, 但是完全满足 EFI 起爆的需要。

定义电压曲线峰值的对应点即爆炸箔爆发时刻为 t_b , 则爆炸箔的峰值功率值 P_b , 爆炸箔在电爆炸过程中沉积的能量 W , 能量利用效率 η , 按下面公式计算:

$$P_b = u_b \times i_b \quad (3)$$

$$W = \int_{t_1}^{t_b} U \cdot Idt \quad (4)$$

$$\eta = \frac{2W}{CU_0^2} \quad (5)$$

式中, u_b 为爆炸箔爆发时刻的电压, V; i_b 为爆发时刻电流, A; t_1 为电压开始时刻, μs ; C 为储能电容, μF ;

U_0 为充电电压, V。

4.3 爆炸箔电爆伏安特性曲线

对 Cu 爆炸箔, 常态电阻约为 100 m Ω , 分别在不同充电电压 3000, 2500, 2000, 1500 V 下进行起爆, 得到伏安特性曲线图 5。由图 5 可见: 爆炸箔的爆发时

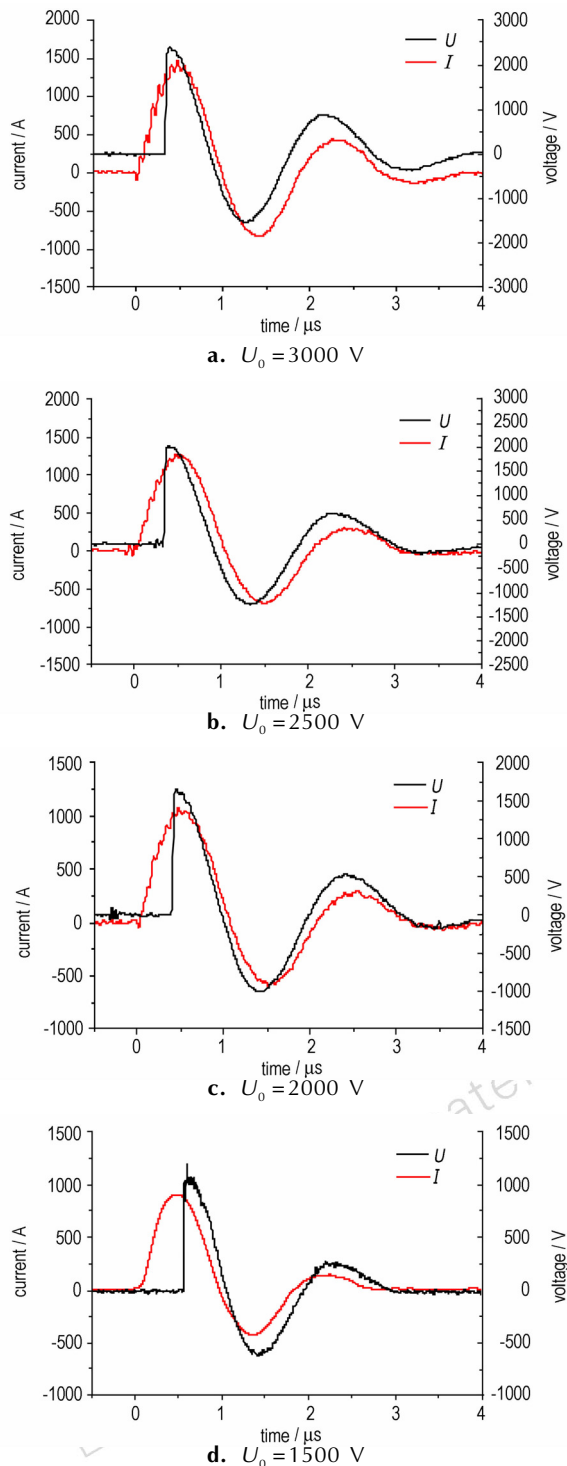


图 5 爆炸箔 Cu 在不同充电电压下伏安特性曲线

Fig. 5 Volt-ampere characteristic curves of Cu exploding foils at different charging voltages

刻(即电压峰值时刻)都选在电流曲线的前 1/4 周期附近。究其原因可能为爆炸箔的电阻随着脉冲大电流通过时温度的升高而不断增大, 造成箔两端的电压不断上升。当爆炸箔被加热到汽化阶段时, 其电阻达到最大值, 此时通过爆炸箔的电流继续上升, 已经达到汽化状态的金属气就会发生击穿, 变成电阻率极低的等离子体, 桥端电压便会急剧下降。

由图 5、公式(3)~(5)得到 Cu 爆炸箔在不同充电电压下的电爆参数, 见表 2。由表 2 可知: (1) Cu 爆炸箔的爆发电流密度很大, 达到了 10^7 A \cdot cm $^{-2}$ 的数量级, 根据导体电爆炸的判据依据^[12]可知导体发生电爆炸, 而且随着充电电压的增大, 爆炸箔的峰值电流、爆发电流增大, 爆炸时间缩短, 但电流的峰值时刻变化不大。(2) 充电电压在 3000 V 下其爆发时刻超前于电流峰值时刻, 约为脉冲电流峰值时刻的 1/5 ~ 1/4。所以爆炸箔爆炸后, 电容后续放电的能量都被浪费在回路中而得不到利用, 导致能量利用率较低。可降低充电电压, 在 2500, 2000 V 时电压峰值较接近于电流峰值时刻, 电爆后桥区气化完全, 这说明起爆电压与爆炸箔匹配度较高, 爆炸箔爆炸后电流的迅速下降损失的能量较少, 能量利用率也较高。继续降低电压在 1500 V 爆炸箔就会在电流峰值稍后处发生电爆炸, 电爆后桥区气化不完全, 部分爆炸箔还有电阻, 不利于飞片形成及加速。可见爆发时刻与电流峰值时刻越接近, 能量利用率越高, 选择在充电电压 2000, 2500 V 下对三种爆炸箔进行电爆实验, 所得结果会更有意义。测试不同爆炸箔的电爆参数, 结果见表 3。

由表 3 可见, 在相同的充电电压下, Cu/Al/Ni 爆炸箔的爆发电流、爆发时刻的功率大于 Cu/Au、Cu 爆炸箔, 充电电压在 2500 V 下 Cu/Al/Ni 爆发电流比 Cu 爆炸箔增长了 36%, 2000 V 下 Cu/Al/Ni 爆发电流比 Cu 爆炸箔增长了 15%。分析原因可能为 Cu/Al/Ni 爆炸箔间纳米级多层 Al/Ni 复合膜在外界瞬时大电流的刺激下产生了自持放热反应, 该反应的放热性在一定程度上增加其电爆性能, 导致爆炸箔爆发电流的提高, 从而提高了能量利用率。在相同的充电电压下, Cu/Au 爆炸箔的爆发电流略大于 Cu 爆炸箔, 2500 V 充电电压下 Cu/Au 爆发电流比 Cu 增长了 4%, 2000 V 下 Cu/Au 爆发电流比 Cu 增长了 3%。分析原因可能为 Cu/Au 爆炸箔因表面溅射了一层金属 Au, Au 属于导电性好、沸腾温度值低且升华能值低的金属导体, 实际应用中若用比电阻和升华能量的乘积作为评价标准, Au 比 Cu 更适合做电爆炸导体。韩

成智^[13]利用对爆炸箔起爆的物理过程深入分析的基础上,建立了模拟电爆炸箔起爆过程的二维模型对Au、Cu材料的爆炸箔进行模拟计算,得到在相同起爆条件下,Au材料的爆炸箔的爆发电流略大于Cu,与实验结论吻合。综上结果,可见Cu/Al/Ni、Cu/Au、Cu

爆炸箔的爆发电流在相同的充电电压下Cu/Al/Ni>Cu/Au>Cu,且充电电压在2500V时比2000V Cu/Al/Ni爆炸箔的爆发电流相对于Cu爆炸箔增长得更多。所以选择在该电压2500V下对三种爆炸箔起爆时产生的等离子体进行进一步研究。

表2 爆炸箔Cu在不同充电电压下电爆参数

Table 2 Electro explosive parameters of Cu exploding foils at different charging voltages

U_0/V	I/A	$T/\mu s$	$T_b/\mu s$	U_b/V	I_b/A	$j_b/A \cdot cm^{-2}$	P_b/MW	W/J	Energy utilization efficiency
3000	1472	0.472	0.384	2421	1302	8.7×10^7	3.2	0.13	13%
2500	1280	0.471	0.395	2036	1205	8.0×10^7	2.5	0.11	18%
2000	1073	0.476	0.423	1645	1017	6.8×10^7	1.7	0.06	15%
1500	907	0.473	0.397	1201	845	5.7×10^7	1.0	0.03	12%

Note: U_0 is charging voltage; I is peak current; T is peak moment; T_b is burst moment; U_b is burst voltage; I_b is burst current; j_b is current ampere density; P_b is peak power; W is depositional energy.

表3 充电电压为2000V和2500V下三种爆炸箔的电爆参数

Table 3 Electro explosive parameters of three kinds of exploding foils at charging voltage of 2000, 2500 V

sample	U/V	I/A	$T/\mu s$	$T_b/\mu s$	U_b/V	I_b/A	P_b/MW
Cu	2000	1076	0.476	0.423	1645	1017	1.67
	2500	1280	0.471	0.395	2036	1205	2.45
Cu/Au	2000	1086	0.457	0.411	1658	1048	1.74
	2500	1288	0.439	0.401	2045	1259	2.57
Cu/Al/Ni	2000	1297	0.420	0.388	1698	1167	1.98
	2500	1709	0.424	0.386	2093	1632	3.42

Note: U is charging voltage; I is peak current; T is peak moment; T_b is burst moment; U_b is burst voltage; I_b is burst current; P_b is peak power.

4.4 爆炸箔等离子强度和尺寸分析

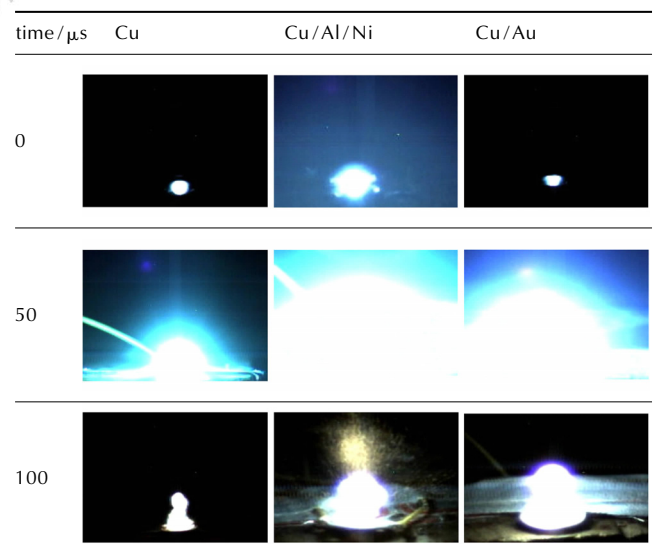
采用高速摄影仪REDLAKE HG-100K,拍摄速率为 $20000 \text{ frames} \cdot \text{s}^{-1}$,直观观测爆炸箔的电爆过程。表4为Cu/Al/Ni、Cu/Au、Cu三种爆炸箔在充电电压为2500V下的电爆过程,关于电爆过程的起始时刻,这里认为是在第一张,其中图中相邻照片时间间隔 $50 \mu s$ 。

由表4可见,在2500V充电电压下起爆时三种爆炸箔的桥区周围的空间里都形成了一个边界模糊的等离子体羽,中间部分呈明亮的白炽色,在 $50 \mu s$ 时等离子体羽强度最大,且Cu/Al/Ni产生的等离子体羽大于Cu/Au、Cu。在 $100 \mu s$ 时,Cu/Al/Ni爆炸箔相对于其他爆炸箔出现了明显黄色的火花光斑,伴随着产物粒子的飞溅,且持续时间比Cu/Au、Cu多出 $100 \mu s$, (由于图片过多,未全部列出)。分析原因可能为与单纯的金属薄膜材料相比,Al/Ni纳米级多层复合膜在电能的作用下不仅发生了与单纯金属薄膜材料相同的物理行为而且发生两金属相之间的反应,转化电能能量的同时释放出材料本身的能量,使得在2500V起爆时,

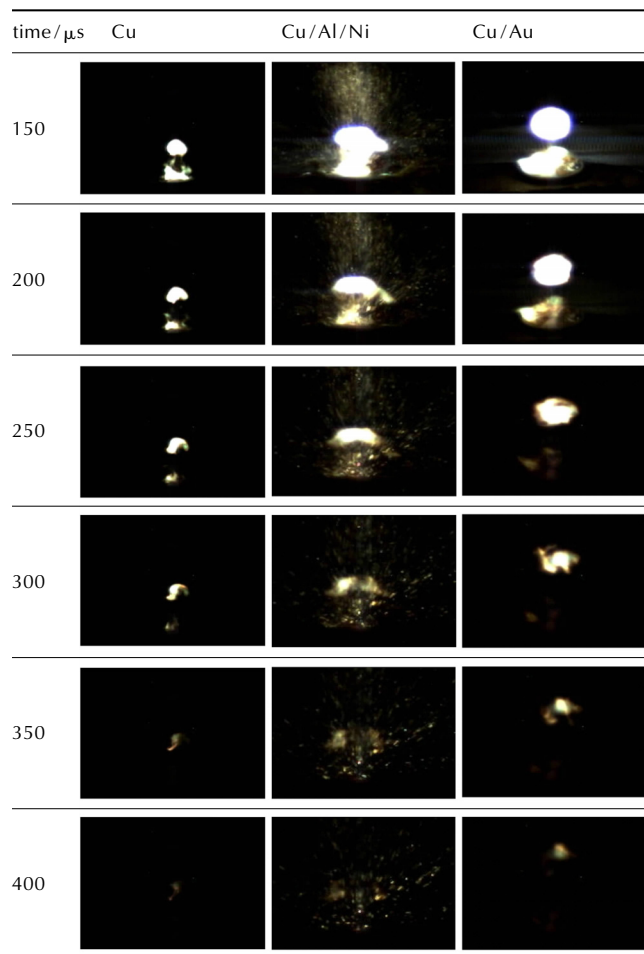
Cu/Al/Ni的电爆性能明显优于Cu/Au、Cu爆炸箔。

表4 2500V充电电压下三种爆炸箔的电爆现象

Table 4 Electro explosive phenomenon of three kinds of exploding foils at charging voltage of 2500 V



续表



5 结 论

(1) 采用闭合场非平衡磁控溅射离子镀技术和皮秒激光微加工系统, 制备出具有优良电爆性能的 Cu 爆炸箔(厚度为 $5\ \mu\text{m}$), Cu/Au 爆炸箔(厚度为 $4\ \mu\text{m}$ Cu/ $1\ \mu\text{m}$ Au), Cu/Al/Ni 爆炸箔(厚度为 $4\ \mu\text{m}$ Cu/ $0.3\ \mu\text{m}$ Al/ $0.2\ \mu\text{m}$ Ni) 三种爆炸箔, 利用 XRD 检测手段对其化学成分进行了分析, 得到爆炸箔的纯度很高, 发现 Cu、Au、Al、Ni 等特征峰, 未检测到明显的 CuO 或 Cu_xO 等特征峰。

(2) 利用自制起爆回路对爆炸箔的电爆性能进行了研究, 得到爆发电流密度达到了 $10^7\ \text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 数量级, 充电电压在 2000, 2500 V 时, 爆发时刻与电流峰值时刻较接近, 能量利用率也较高。并此充电电压下进行了三种爆炸箔的性能对比测试, 得到在相同的充电电压下 Cu/Al/Ni、Cu/Au、Cu 爆炸箔的爆发电流 $\text{Cu/Al/Ni} > \text{Cu/Au} > \text{Cu}$, 在充电电压 2500 V 时 Cu/Al/Ni 爆发电流比 Cu 增长了 36%, 2000V 下比 Cu 增长

了 15%, 可见充电电压在 2500 V 时比 2000 V Cu/Al/Ni 爆炸箔的爆发电流相对于 Cu 爆炸箔增长得更多。所以选择在该电压 2500 V 下通过高速摄影法对三种爆炸箔的等离子体进行进一步的研究, 得到 $50\ \mu\text{s}$ 时 Cu/Al/Ni 产生的等离子体羽的尺寸大于 Cu/Au、Cu 爆炸箔。可见 Al/Ni 多层复合膜在纳米级范围内具有优良的电爆性能, 添加到传统的冲击片雷管的爆炸箔 Cu 膜中, 能提高其能量利用率, 从而实现起爆系统的低能化。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王殿湘, 王科伟. 爆炸箔尺寸对冲击片电爆参数的影响[J]. 火工品, 2010(6): 17-19.
WANG Dian-xiang, WANG Ken-wei, et al. Influence of bridge foil size on electric initiation parameters of slapper[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010(6): 17-19.
- [3] 褚恩义, 任西, 钱勇, 等. 爆炸箔冲击片起爆设计参数研究[J]. 火工品, 2008(3): 26-29.
CHU En-yi, REN Xi, QIAN Yong, et al. Study on the design parameters of exploding foil initiation[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2008(3): 26-29.
- [4] 韩志伟, 褚恩义, 王可喧, 等. 爆炸箔厚度与其电爆性能和冲击片雷管感度的关系研究[J]. 火工品, 2009(6): 8-10.
HAN Zhi-wei, CHU En-yi, WANG Ke-xuan, et al. Study on the relationship between the thickness of exploding foil and its electrical explosion performance & sensitivity of slapper detonator[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2009(6): 8-10.
- [5] 冯长根, 伍俊英, 陈郎, 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.
- [6] Morris C J, Mary B, Zakar E, et al. Rapid initiation of reactions in Al/Ni multilayers with nanoscale layering[J]. *J Phys Chem Solids*, 2010, 71(2): 84-89.
- [7] 周翔. 用于冲击片雷管的 Al/CuO 反应含能桥膜研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
ZHOU Xiang. Research on Al/CuO-based reactive energetic bridge foils applied in exploding foil initiator[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2012.
- [8] Fischer S H, Grubelich M C. Theoretical energy release of thermites intermetallics and combustible metals [R]. OSTI-ID: 658208 Sandia National Labs, Albuquerque, NM(US), 1988.
- [9] 金晓云, 胡艳, 沈瑞琪, 等. 嵌入式 Al/Ni 纳米复合材料的制备与表征[J]. 火工品, 2011(5): 24-28.
JIN Xiao-yun, HU Yan, SHEN Rui-qi, et al. Fabrication and characterization of embedded Al/Ni nanocomposition[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2011(5): 24-28.
- [10] 谭迎新, 张景林. 飞片起爆试验装置中能源供给系统的性能[J].

火炸药学报, 2005, 28(1): 22-24.

TAN Yin-xin, ZHANG Jing-lin. Properties of the supplying power system for the flyer- initiating device [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005, 28(1): 22-24.

[11] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长, 等. 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.

[12] 王莹. 电爆炸导体及其应用[J]. 爆炸与冲击, 1986, 6(2): 184-191. WANG Ying. Electrical exploding conductor and its applications [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1986, 6(2): 184-191.

[13] 韩成智. 电爆炸箔起爆系统作用过程研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2006.

HAN Cheng-zhi. Study on the electric explosion system [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology University, 2006.

Preparation and Electrical Performance of Exploding Foil in Slapper Detonator

HUANG Na¹, TANG Hong-pei², HUANG Yin-sheng¹, HE Yi¹

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Guangdong HongDa Blasting Co., Ltd Guang-Zhou 510623, China)

Abstract: In order to improve energy utilization ratio of initiation system, three kinds of exploding foils Cu, Cu/Au and Cu/Al/Ni were prepared by the closed-field unbalanced magnetron sputtering iron plating technology and pico-second laser micromachining system. And their electro explosive performances were studied by designed test circuit. It is found when charging voltage are 2000 V or 2500 V, initiation voltage can match with Cu exploding foil in high energy utilization rate. And the electrical explosion performances in three kinds of exploding foils were also tested at 2000 V and 2500 V. which indicates that Cu/Al/Ni burst current is much higher than the Cu/Au and Cu with an increase of 36% compared with Cu at charging voltage of 2500 V, and 15% compared with Cu at 2000 V. The plasma plumes generated during the explosion in three kinds of exploding foils were observed by high-speed photography when the charging voltage is 2500 V. Results show that the size of the plasma plumes Cu/Al/Ni > Cu/Au > Cu. Finally, Cu/Al/Ni exploding foil is more conducive to low energy exploding foil initiator systems under the same initiating condition.

Key words: military chemistry and pyrotechnics; slapper detonators; magnetron sputtering; laser micromachining; electro explosive performance

CLC number: TJ45; E913

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.04.017