

文章编号:1006-9941(2019)06-0456-09

# 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

杨爽,孙秀娟,王万军,付秋波

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川绵阳621999)

**摘要:** 为探索复合多层膜爆炸箔电爆炸的作用机理,开展了Ni/Cu复合多层膜爆炸箔性能研究。采用电化学沉积方法制备了相同厚度的Ni/Cu复合多层膜(调制周期分别为200 nm/300 nm和300 nm/400 nm)及纯Cu、Ni金属膜,通过等离子体发射光谱特性测试分析,计算获得了不同放电电流条件下不同结构的Ni/Cu复合多层膜、纯Cu、Ni金属膜电爆炸等离子体电子温度。通过匹配加速腔、飞片进行了爆炸箔推动飞片的PDV速度测试和分析,获得了不同放电电流条件下Ni/Cu复合多层膜、纯Cu、Ni金属膜爆炸箔推动飞片性能。研究表明:在电流为2.5 kA时,(Ni<sub>200</sub>Cu<sub>300</sub>)<sub>8</sub>和(Ni<sub>300</sub>Cu<sub>400</sub>)<sub>5</sub>Ni<sub>300</sub>电爆炸等离子体发射光谱强度以及等离子体电子温度均高于纯Cu和纯Ni,说明Ni/Cu复合材料在相同条件下电爆炸储能密度更高;在电流为2.5 kA时,Ni/Cu复合材料中的Ni开始对等离子体推动飞片起促进作用,(Ni<sub>200</sub>Cu<sub>300</sub>)<sub>8</sub>和(Ni<sub>300</sub>Cu<sub>400</sub>)<sub>5</sub>Ni<sub>300</sub>爆炸箔推动飞片的加速时间更长,最终速度均高于纯Cu爆炸箔。

**关键词:** Ni/Cu复合多层膜;电爆炸等离子体;发射光谱;飞片

**中图分类号:** TJ45

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018346

## 1 引言

爆炸箔起爆器(EFIs)是一种具有高安全性和可靠性的火工品,由爆炸箔、飞片、加速腔和炸药组成。在爆炸箔起爆器作用过程中,爆炸箔起着能量转换的关键作用,是影响冲击片雷管起爆性能的关键元件,其中国内外的爆炸箔材料大多以纯铜为主<sup>[1-3]</sup>。随着工程应用小型化和低能化的发展,亟需找到一种可以降低冲击片雷管起爆能量的爆炸箔新材料。国内外学者尝试将含能复合膜应用于爆炸箔材料,以期提高爆炸箔等离子体的输出能力,主流纳米含能复合薄膜为Al/Ni<sup>[4-9]</sup>。Morris C J等<sup>[4]</sup>对比了相同厚度的Al/Ni复合薄膜和Cu爆炸箔驱动飞片的能力,指出多层膜驱动飞片的动能高于Cu箔。蒋洪川等<sup>[7]</sup>研究在Cu桥箔上集成Al/Ni复合薄膜,发现Cu/Al/Ni复合爆炸箔电爆

炸的阈值电压比纯Cu箔低,电爆炸温度比纯Cu箔高。王窈等<sup>[8-9]</sup>进一步研究了Al/Ni复合爆炸箔的电和能量输出特性,结果表明Al/Ni复合爆炸箔比纯Cu箔和纯Ni箔的爆发电压高,爆发时间短,吸收能量高,驱动飞片速度也更高。以上试验结果均表明Al/Ni含能复合薄膜有利于优化现有EFI系统。但是,上述研究没有Al/Ni复合材料与纯Al的电爆炸性能对比分析,实验数据无法分析获得Al/Ni电爆炸性能优于Cu箔的准确原因,即复合爆炸箔的作用机理尚不明确。

已知Cu和Ni具有相同的面心立方体晶体结构,原子大小也基本相同(Cu 124 μm, Ni 120 μm)<sup>[10-12]</sup>,Ni/Cu复合材料不存在合金化反应,因此为了探索复合爆炸箔的作用机理,本研究采用Ni/Cu复合材料作为爆炸箔,与纯Cu和纯Ni箔进行对比,研究了电爆炸等离子体发射光谱特性及飞片推动性能。采用等离子体发射光谱<sup>[13-14]</sup>及飞片速度PDV测试手段,对比了不同结构的Ni/Cu复合多层膜和纯Cu、Ni金属膜的等离子体发射光谱谱线强度以及推动飞片速度曲线特征。

## 2 实验部分

### 2.1 样品制备及表征

采用电化学沉积工艺进行金属薄膜的制备。首先

收稿日期:2018-12-05;修回日期:2019-03-13

网络出版日期:2019-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助(11872342)

作者简介:杨爽(1987-),女,硕士,主要从事EFIs集成设计开发研究。e-mail:baicaishuangr@163.com

通信联系人:付秋波(1977-),女,博士,主要从事EFIs集成设计开发研究。e-mail:fuqiubo@caep.cn

引用本文: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.

在玻璃基底 (PYREX7740) 上磁控溅射一层厚约 100 nm 的 Ge 层作为导电层, 然后分别电化学沉积调制周期为 300 nm/400 nm 和 200 nm/300 nm 的 Ni/Cu 复合多层膜。Ni/Cu 复合多层膜采用交替沉积 Ni 层和 Cu 层的方式: 调制周期为 300 nm/400 nm 时交替沉积 5 次, 最后沉积一层 300 nm 的 Ni 膜, 记为  $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$ ; 调制周期为 200 nm/300 nm 时交替沉积 8 次, 记为  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$ 。纯 Cu 膜和 Ni 膜为一次性沉积至约 4  $\mu\text{m}$ 。对制备好的 Ni/Cu 复合薄膜进行了 SEM 及 XRD 测试表征。

## 2.2 等离子体发射光谱特性测试方法

通过测试等离子体的发射光谱, 利用 Boltzmann 图谱法<sup>[15]</sup>计算电爆炸等离子体的电子温度。已知等离子体在满足局部热力学平衡 (Local Thermodynamic Equilibrium, LTE)<sup>[16]</sup>条件下, 等离子体中各粒子在其束缚能级上按 Boltzmann 分布, 同一电离级两条光谱线的强度关系可表示为:

$$\frac{I_{mn}(2)}{I_{mn}(1)} = \frac{A_{mn}(2)g_m(2)\lambda_1}{A_{mn}(1)g_m(1)\lambda_2} \times \exp\left[-\frac{E_m(2)-E_m(1)}{KT}\right] \quad (1)$$

式中, 标号 1、2 代表不同的谱线,  $A_{mn}$  为相应谱线的跃迁几率,  $\text{s}^{-1}$ ,  $g_m$  为上能级的统计权重,  $E_m$  是相应上能级能量,  $\text{cm}^{-1}$ ,  $\lambda$  为波长,  $\text{nm}$ ,  $K=1.3806504 \times 10^{-23}$ , 为玻尔兹曼常数,  $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ 。在求电子温度时, 以其中某条谱线  $I_{mn}(1)$  做基准, 其他谱线的强度  $I_{mn}(2)$  与  $I_{mn}(1)$  相比, 再取对数, 则式(1)可写为:

$$\ln\left(\frac{\lambda_2 I_{mn}(2)/I_{mn}(1)}{A_{mn}(2)g_m(2)}\right) = -\frac{E_m(2)-E_m(1)}{KT} + c_0 \quad (2)$$

式中,  $c_0$  为常数。由式(2)可知, 只需作谱线相对强度的对数值与  $E_m$  的 Boltzmann 图, 求出其斜率  $(-1/KT)$ , 便可确定电子温度  $T, \text{K}$ 。

计算 Ni/Cu、Cu 等离子体电子温度选用的铜原子谱线及相关光谱物理参数<sup>[17]</sup>见表 1。

表 1 CuI 发射光谱谱线的相关物理参数<sup>[17]</sup>

wavelength / nm	$E_m / \text{cm}^{-1}$	$A_{mn} / 10^7 \text{s}^{-1}$	$g_m$
458.697	62948.260	3.2	6
510.554	30783.697	0.2	4
515.324	49935.195	6	4
570.024	30783.697	0.024	4

Note:  $E_m$  is the energy of upper level.  $A_{mn}$  is the transition probability.  $g_m$  is the partition coefficient associated with the excited level.

计算 Ni 等离子体电子温度选用的镍原子谱线及相关光谱物理参数<sup>[17]</sup>见表 2。

表 2 NiI 发射光谱谱线的相关物理参数<sup>[17]</sup>

wavelength / nm	$E_m / \text{cm}^{-1}$	$A_{mn} / 10^7 \text{s}^{-1}$	$g_m$
438.287	54251.308	0.15	7
452.314	22102.325	3.2e-8	9
463.303	49158.480	0.0078	11
483.118	49777.569	1.6	7

等离子体发射光谱测试采集原理示意图如图 1 所示。测试系统主要包含两部分: 爆炸箔放电测试电路和光谱信号采集分析系统, 其中放电回路主要包含电子开关 VCS、0.47  $\mu\text{F}$  薄膜电容和爆炸箔, 爆炸箔表面焊接铜箔作为电极, 采用高压电源 (PS350/5000 V-25 W) 为电容充电, 罗氏线圈 (PEM CWTMini 30B) 测量放电回路电流并用示波器监测, 信号发生器 (Agilent 33500B) 用于触发 VCS。光谱信号采集分析系统主要

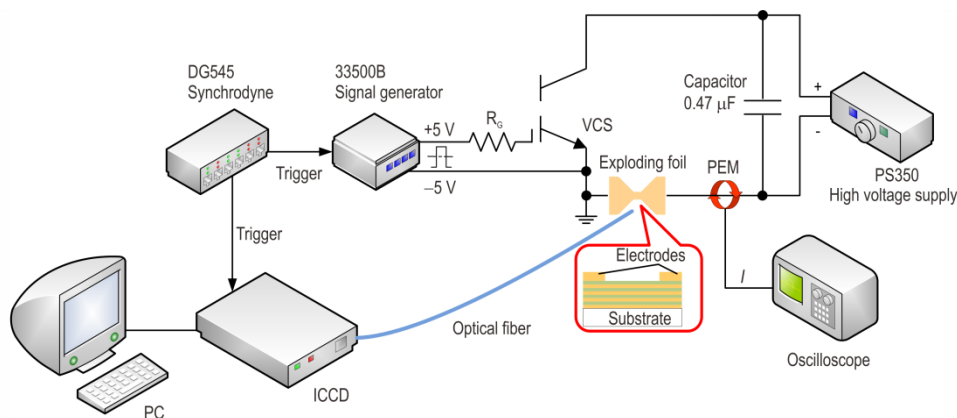


图 1 等离子体发射光谱采集原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the plasma emission spectrometry acquisition

包含光纤探测器、光谱仪(Shamrock 303i A, 采用 Andor DH720-18F-03 型 ICCD)和计算机。在与爆炸箔表面的法线方向观测光谱信号, 光谱信号经光纤采集传输至光谱仪再输入到计算机进行分析。通过同步机

(DG545)实现放电回路和光谱仪的同步延时。

### 2.3 飞片速度 PDV 测试方法

采用光子多普勒测速仪(PDV)进行飞片速度测量, 测试示意图如图 2 所示。

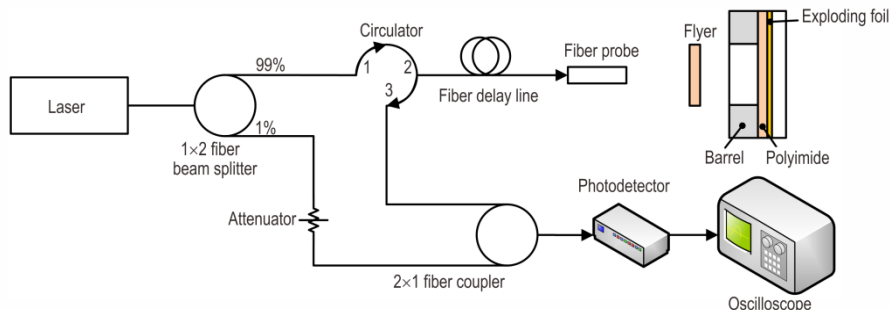


图 2 飞片速度 PDV 测试示意图

Fig.2 PDV diagram for the flyer speed test

测速仪采用波长为 1550 nm 的激光作为光源, 采用微型光纤探头作为末端传感器。激光器输出的光被 1×2 光纤分束器分成 2 路, 一束光经过环形器 1 端口从环形器 2 端口出射, 再由光纤探头射向飞片, 从飞片反射回来的光由同一探头收集进入环形器 2 端口, 然后从环形器 3 端口出射, 到达 2×1 光纤耦合器中。分束器分出来的另一束光经过一个衰减器后进入 2×1 光纤耦合器, 与信号光发生光学混频干涉。当飞片运动时, 由于多普勒效应, 信号光频率产生与飞片运动速度成正比的偏移, 导致干涉光频率发生正比于飞片速度的变化。最后由光电探测器获取混频信号, 并由高速数字示波器(Agilent DSA-X93204A)记录下干涉光的频率变化, 即可计算获得飞片运动的速度历程。

根据光的干涉理论, 干涉波形信号可表示为:

$$I(t) = I_0(t) + I_d(t) + 2\sqrt{I_0(t)I_d(t)} \cos\left\{2\pi \int_0^t [f_d(t) - f_0(t)] dt + \varphi_0\right\} \quad (3)$$

式中,  $I_0(t)$  为参考光光强, cd;  $I_d(t)$  为靶面回光光强, cd;  $f_0(t)$  为参考光频率, Hz;  $f_d(t)$  为信号光频率, Hz;  $\varphi_0$  为初始相位角。式(3)等号右边的前两项为直流分量, 第 3 项为带有与飞片运动速度相关的频率变化的交流分量。由第 3 项表达式可知, 飞片不动,  $f_d(t) = f_0(t)$ ; 飞片运动, 则在某一特定时刻可得到二者的频率差为  $f_d(t) - f_0(t)$ , 对以该时刻为中心时刻的短时波形信号进行短时傅里叶变换(STFT)之后, 频谱能量主要集中在  $f_d(t) - f_0(t)$  频率处, 即用短时傅里叶变换从时频能量谱上通过分辨出能量集中频段, 可辨别出该中心时刻以  $f_d(t) - f_0(t)$  为特征频率的信息。由多普勒频移原理  $f_d(t) - f_0(t) = 2v(t)/\lambda_0$

可得

$$v(t) = 1/2 [f_d(t) - f_0(t)] / \lambda_0 \quad (5)$$

式中,  $v(t)$  为飞片运动速度,  $m \cdot s^{-1}$ ,  $\lambda_0$  为中心波长, nm。即获得特征频率之后, 经线性转换便获得了特征速度。

## 3 结果与讨论

### 3.1 Ni/Cu 复合爆炸箔制备

Ni/Cu 复合薄膜 SEM 测试结果如图 3 所示。由图 3

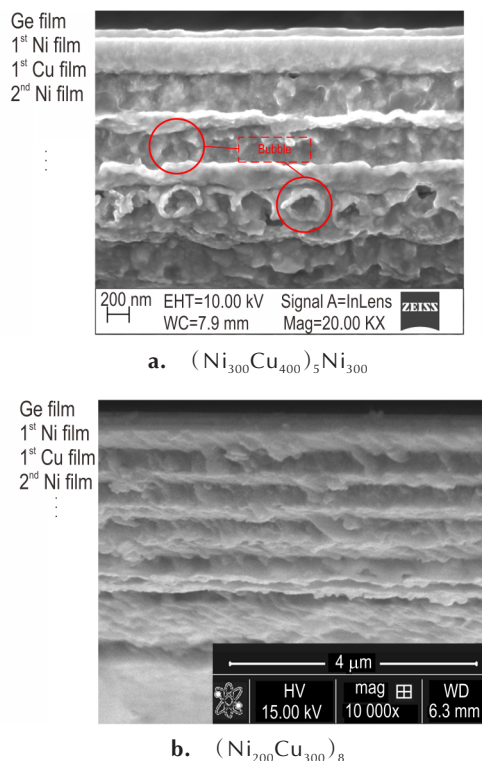


图 3 Ni/Cu 复合多层膜扫描电镜图

Fig.3 SEM micrographs of the Ni/Cu multilayers

可以看出, Ni 和 Cu 层间的分界比较清晰, Cu 层的厚度控制较好, 基本保持一致, 但是 Ni 层的厚度均一性较差。由图 3a 还可以看出, 在 Cu 层中有较多泡状结构, 导致 Cu 层与 Ni 层的交界不均匀, 从而造成 Ni 金属层均一性变差, 同时也会降低金属膜的密度。

Ni/Cu 复合薄膜 XRD 测试结果如图 4 所示。Ni/Cu 复合薄膜在  $43.35^\circ$ 、 $44.51^\circ$ 、 $50.51^\circ$ 、 $51.83^\circ$  和  $74.23^\circ$  处有五个明显的衍射峰, 这五个明显的特征衍射峰分别与 Cu(111)、Ni(111)、Cu(200)、Ni(200) 和 Cu(220) 晶面对应, 而不同调制周期的 Ni/Cu 复合薄膜 X 射线衍射峰与面心立方体 Cu 和面心立方体 Ni 的衍射峰基本一致, 这说明制备的 Ni/Cu 复合薄膜具有较好的结晶度, 其晶型为面心立方体。

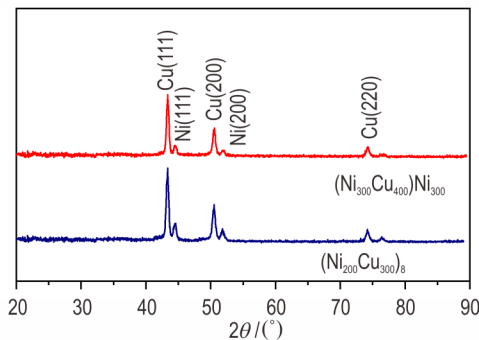


图 4 Ni/Cu 复合多层膜 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of the Ni/Cu multilayers

制备好的薄膜采用皮秒激光加工进行图形化, 最终成为爆炸箔,  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$  样品照片如图 5 所示。加工的爆炸箔桥区为方形, 尺寸为  $0.4\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$ 。一片直径 4 寸的玻璃片上可加工出 54 片爆炸箔样品, 相比于化学刻蚀, 样品制备效率较高。采用微电阻计测量了 Ni/Cu 复合爆炸箔及纯 Cu、纯 Ni 爆炸箔电阻, 结果统计如表 3 所示。

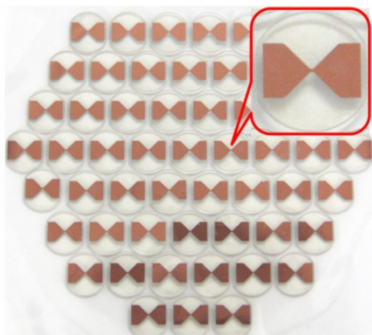


图 5 图形化  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$  复合爆炸箔

Fig.5 Pictures of the  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$  exploding foil

由表 3 可以看出, 纯 Cu 爆炸箔电阻最小, 纯 Ni 爆炸箔电阻最大,  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$  和  $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$  电阻

介于二者之间。

表 3 Ni/Cu 复合爆炸箔及纯 Cu、纯 Ni 爆炸箔电阻

Table 3 The electrical resistance of the Ni/Cu composites, pure Cu and pure Ni exploding foil

exploding foil	number	average resistance / mΩ	standard deviation / mΩ
$(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$	15	34.0	2.1
$(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$	14	34.0	1.7
Cu	13	20.2	1.5
Ni	12	75.9	8.9

### 3.2 等离子体发射光谱特性测试

按照图 1 进行了爆炸箔等离子体发射光谱测试, 放电电流设为 1.5 kA、2.0 kA 和 2.5 kA。将采集光谱时刻相对于放电电流零点时刻的时间作为延迟时间。为研究复合爆炸箔的时间分辨发射光谱, 在不同放电电流下, 分别选择延迟时间 1000 ns、1200 ns 和 1400 ns, 设置快门速度为 200 ns。Ni/Cu 复合爆炸箔、纯 Cu 爆炸箔和纯 Ni 爆炸箔的发射光谱测试结果如图 6 所示。

图 6 可以看出:  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$  和  $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$  发射光谱兼具纯 Cu 和纯 Ni 的谱线特征; 随着放电电流升高, 四种爆炸箔等离子体发射光谱谱线强度均升高; 在相同放电电流和延迟时间下, 四种爆炸箔中 Ni 的发射光谱谱线强度最低; 时间延迟相同时, 放电电流为 1.5 kA, 发射光谱谱线强度排序为  $\text{Cu} \approx (\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300} > (\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8 > \text{Ni}$ , 放电电流为 2.0 kA, 发射光谱谱线强度排序为  $\text{Cu} \approx (\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8 > (\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300} > \text{Ni}$ , 放电电流为 2.5 kA, 发射光谱谱线强度排序为  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8 > (\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300} > \text{Cu} > \text{Ni}$ 。

为了更清楚地观察不同爆炸箔样品中发射光谱谱线强度的变化规律, 首先对比了  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$ 、 $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$  和纯 Cu 发射光谱中较强的几条谱线 (Cu II 461.966 nm、Cu I 510.554 nm 和 Cu I 515.324 nm), 结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出: 对于  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$  爆炸箔, 当放电电流从 1.5 kA 升高到 2.0 kA 时 Cu I 和 Cu II 谱线强度提升最大, 约 300% 以上; 对于  $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$  爆炸箔, 当放电电流从 2.0 kA 升高到 2.5 kA 时 Cu I 和 Cu II 谱线强度提升最大, 约 100% 以上; 对于纯 Cu 爆炸箔, 当放电电流从 1.5 kA 升高到 2.0 kA 时 Cu I 和 Cu II 谱线强度提升最大, 约 150% 以上。以上结果说明,  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$  和纯 Cu 箔在 2.0 kA 时爆发比较充分,

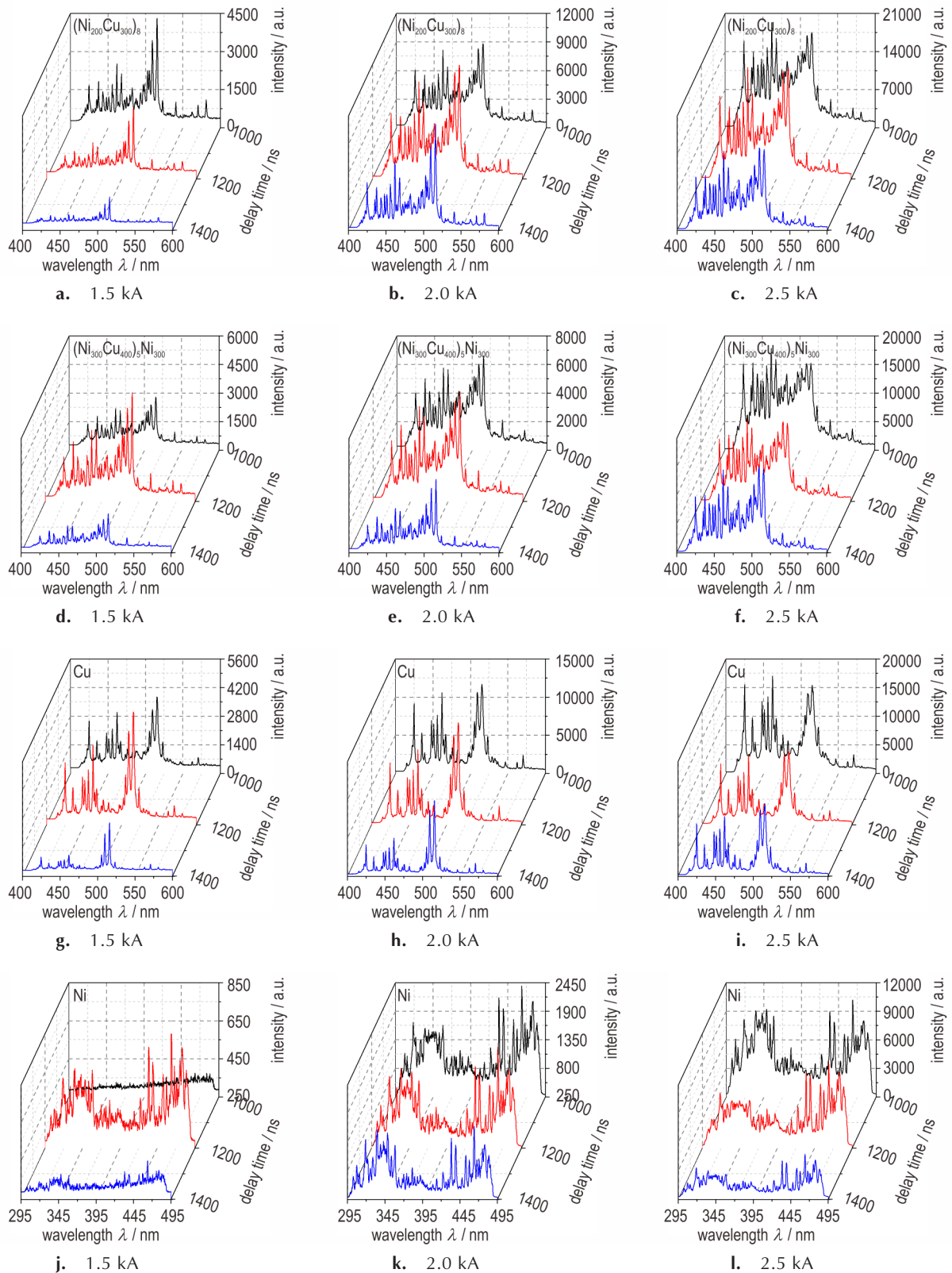


图6  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$ 、 $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$ 、Cu、Ni等离子体发射光谱曲线

Fig.6 The plasma emission spectroscopic curves of the  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$ 、 $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$ 、Cu and Ni

表 4 CuI 461.966 nm、CuI 510.554 nm 和 CuI 515.324 nm 谱线随时间变化

Table 4 The spectral line strength of CuI 461.966 nm, CuI 510.554 nm and CuI 515.324 nm changes with delay time

discharge current /kA	sample	delay time /ns	CuI 461.966 nm	CuI 510.554 nm	CuI 515.324 nm	
1.5	$(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$	1000	2515	1892	4233	
		1200	1434	2290	2822	
		1400	613	1029	1308	
	$(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$	1000	2193	2374	2798	
		1200	3745	4908	5712	
		1400	1412	1746	2043	
	Cu	1000	2970	3136	3731	
		1200	3877	4583	5509	
		1400	1012	2069	2603	
	2.0	$(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$	1000	8156	8308	8824
			1200	10171	11171	11958
			1400	7351	9152	11127
$(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$		1000	5756	6030	6616	
		1200	6650	7016	7673	
		1400	3106	4501	5133	
Cu		1000	10603	10613	11698	
		1200	9835	11688	13380	
		1400	4988	8651	9876	
2.5		$(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$	1000	19306	16929	17509
			1200	20474	19720	20491
			1400	14486	15127	14842
	$(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$	1000	17834	15105	15214	
		1200	14641	13946	13659	
		1400	14486	15030	14842	
	Cu	1000	17003	13995	15402	
		1200	12108	12229	13003	
		1400	10416	11577	12659	

而 $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$ 则是在 2.5 kA 时爆发比较充分。

进一步对比分析了 $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$ 、 $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$ 和 Ni 中 Ni I 谱线随时间的变化规律。由于 $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$ 、 $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$ 中 Cu I 光谱较强,湮灭了大部分 Ni I 谱线,仅有 Ni I 463.303 nm 和 483.118 nm 谱线可以分辨出来,两条谱线随时间的变化情况如表 5 所示。

由表 5 可以看出:对于 $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$ 爆炸箔,当放电电流从 1.5 kA 升高到 2.0 kA 时 Ni I 谱线强度提升最大,约 400% 以上;对于 $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$ 爆炸箔,当放电电流从 2.0 kA 升高到 2.5 kA 时 Ni I 谱线强度提升最大,约 200% 以上;对于纯 Ni 爆炸箔,当放电电流从 2.0 kA 升高到 2.5 kA 时 Ni I 谱线强度提升最大,约 300% 以上。以上结果说明, $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$ 在 2.0 kA 时爆发比较充分,而 $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$ 和纯 Ni 箔则是在 2.5 kA 时爆发比较充分,与表 4 分析结论一致。

根据发射光谱谱线,可以对等离子体的电子温度

进行分析。以延迟时间为 1200 ns 为例,根据式(2),以 Cu I 515.324 nm 谱线作基准,绘出表 1 中谱线相对强度值与对应谱线跃迁上能级能量的 Boltzmann 图,由最小二乘法拟合得到斜率。图 7 为延迟 1200 ns 时不同放电条件下 $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$ 发射光谱的 Boltzmann 图。

图 7a、图 7b 和图 7c 中拟合直线的斜率 $(-1/KT)$ 分别为 $(-7.4105 \times 10^{18})$ 、 $(-7.20316 \times 10^{18})$ 和 $(-7.05056 \times 10^{18})$ ,则电子温度分别为 9773.9 K、10055.3 K 和 10272.9 K,拟合度均达 90% 以上。

采用相同方法可以获得不同延迟时间不同放电电流下 $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$ 、 $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$ 和 Cu 发射光谱 Boltzmann 图拟合直线的斜率。同样,以 Ni I 463.303 nm 谱线作基准,绘出表 2 中谱线相对强度值与对应谱线跃迁上能级能量的 Boltzmann 图,由最小二乘法拟合得到斜率。根据拟合直线的斜率 $(-1/KT)$ 可计算获得等离

子体的电子温度,结果如表6所示。

**表5** Ni I 463.303 nm和483.118 nm谱线随时间变化  
**Table 5** The spectral line strength of Ni I 463.303 nm and 483.118 nm changes with delay time

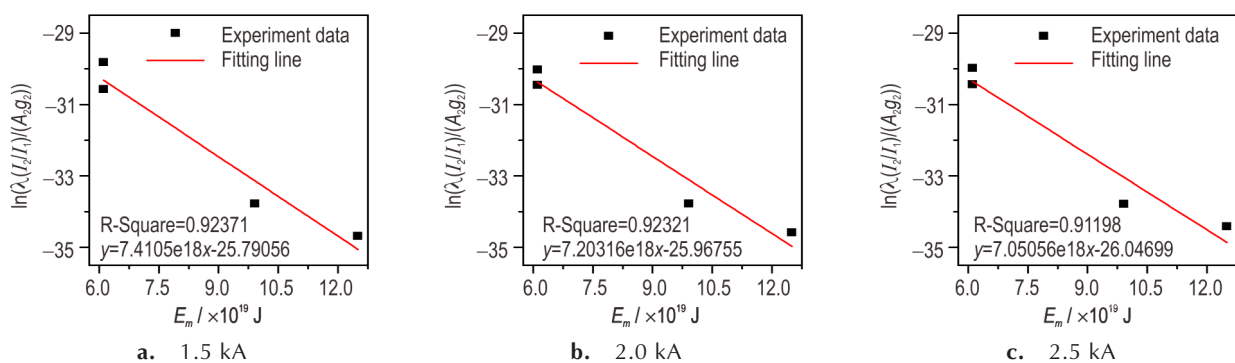
discharge current / kA	sample	Delay time / ns	Ni I 463.303 nm	Ni I 483.118 nm
1.5	$(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$	1000	892	1176
		1200	668	917
		1400	406	491
	$(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$	1000	975	1412
		1200	1392	2437
		1400	640	995
2.0	$(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$	1000	375	372
		1200	931	660
		1400	448	384
	$(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$	1000	3586	4694
		1200	4051	5817
		1400	2710	3802
2.5	$(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$	1000	2911	4133
		1200	2746	4178
		1400	1152	1986
	$(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$	1000	2386	1678
		1200	2190	1427
		1400	1654	1095
2.5	$(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$	1000	9730	12224
		1200	8780	12205
		1400	5968	8937
	$(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$	1000	10162	13369
		1200	7147	9931
		1400	5968	8937
Ni	1000	10181	6759	
	1200	9095	6481	
	1400	4735	3193	

**表6** 等离子体电子温度计算结果  
**Table 6** Results of calculated electron temperature

sample	discharge current / kA	calculated electron temperature / K		
		1000 ns	1200 ns	1400 ns
$(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$	1.5	8608	9773.9	9276.9
	2	10203.5	10055.3	9827.3
	2.5	10624.1	10272.9	10242.4
$(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$	1.5	9804.6	9888.5	9797.5
	2	10466.9	10391.9	10126.7
	2.5	11327.5	10990.6	10966.1
Cu	1.5	10128.7	10053.9	9442.1
	2	10471.1	10360.4	9994.8
	2.5	10532.7	10308.9	10166.5
Ni	1.5	2943.7	2870.3	2856.7
	2	2847.5	2859.2	2865.1
	2.5	2859.3	2846.2	2855.2

由表6可以看出: Ni电爆炸等离子体电子温度较低(<3000 K), Ni/Cu复合材料电爆炸等离子体电子温度与Cu在同一量级( $10^4$  K), 且在1.5 kA和2.0 kA时, Ni/Cu复合材料电爆炸等离子体温度整体比Cu低, 当电流升高到2.5 kA时, Ni/Cu复合材料电爆炸等离子体温度变得比Cu高。

综合上述实验结果, 分析认为: 当放电电流较低时(1.5 kA和2.0 kA), Ni/Cu复合爆炸箔中的Ni电爆炸不充分, 而Ni会吸收部分能量, 从而导致Ni/Cu复合爆炸箔等离子体的能量比纯Cu低, 原子发射光谱强度和等离子体电子温度都比Cu低; 当放电电流较高时(2.5 kA), Ni/Cu复合爆炸箔中的Ni电爆炸比较充分, Ni吸收的能量贡献到Ni/Cu复合爆炸箔等离子体中, 使Ni/Cu复合爆炸箔等离子体的能量比纯Cu高, 即原子发射光谱强度和等离子体电子温度都比Cu高。



**图7** 延迟1200 ns时 $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$ 发射光谱 Boltzmann图  
**Fig.7** Boltzmann diagram of the  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$  emission spectrum when the delay time is 1200 ns

### 3.3 飞片速度 PDV 测试

采用不锈钢加速膛(长 0.4 mm, 孔径为  $\Phi 0.6$  mm)、聚酰亚胺飞片(厚 50  $\mu\text{m}$ ), 与  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$ 、 $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$ 、纯 Cu 和纯 Ni 爆炸箔进行匹配, 按照图 2 所示在放电电流为 1.5、1.75、2.0、2.25 kA 和 2.5 kA 条件下进行 PDV 飞片速度测试, 飞片速度随时间变化如图 8 所示。

由图 8 可以看出: 随着放电电流升高,  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$ 、

$(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$ 、纯 Cu 和纯 Ni 推动飞片的速度均升高, 即推动飞片能力提高; 在放电电流较低时(1.5 kA 和 1.75 kA), Cu 爆炸箔推动飞片速度最高; 放电电流为 2.0 kA 时,  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$  爆炸箔推动飞片速度超过了 Cu; 放电电流为 2.25 kA 时,  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$ 、 $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$  和纯 Cu 推动飞片速度相当; 放电电流为 2.5 kA 时,  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$  和  $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$  爆炸箔推动飞片加速时间更长, 使得飞片速度均超过了纯 Cu。

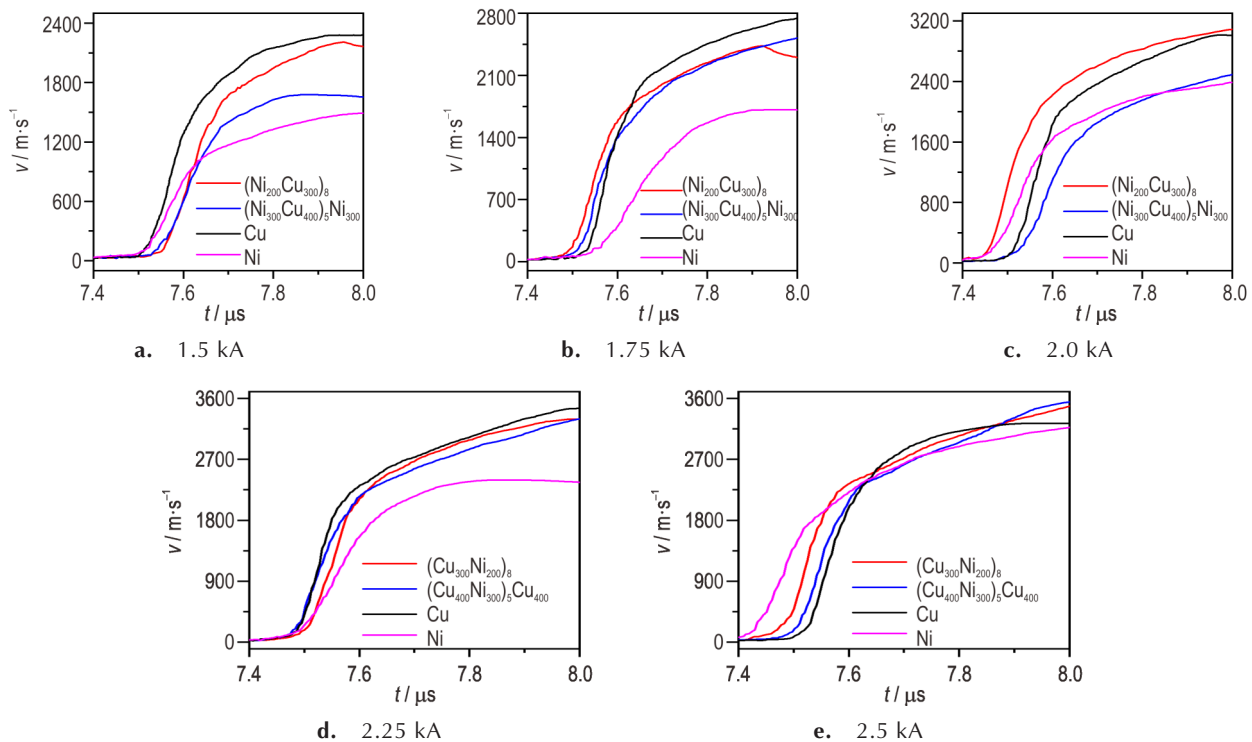


图 8 不同放电电流下 PDV 飞片速度测试曲线

Fig.8 PDV test curves of the flyer speed at different discharge current

## 4 结论

基于等离子体发射光谱和飞片速度 PDV 测试手段, 获得了  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$ 、 $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$ 、纯 Cu 和纯 Ni 等离子体发射光谱特性及推动飞片性能, 主要得出以下结论:

(1)  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$  和  $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$  发射光谱兼具纯 Cu 和纯 Ni 的谱线特征; 放电电流为 2.5 kA 时,  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$  和  $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$  发射光谱谱线强度均高于 Cu。

(2) 在本研究实验条件下, 纯 Ni 电爆炸等离子体电子温度较低 ( $<3000$  K), Ni/Cu 复合材料电爆炸等离子体电子温度与 Cu 在同一量级 ( $10^4$  K), 电流为 2.5 kA

时, Ni/Cu 复合材料电爆炸等离子体温度比 Cu 高。

(3) 放电电流为 2.5 kA 时, Ni/Cu 复合爆炸箔推动飞片加速时间更长, 使得飞片速度均超过了纯 Cu。

(4) 当放电电流较高时 (2.5 kA), Ni/Cu 复合爆炸箔中的 Ni 电爆炸比较充分, 对 Ni/Cu 复合爆炸箔电爆炸具有促进作用。

### 参考文献:

- [1] 陈楷, 徐聪, 朱朋, 等. 加速膛与复合飞片对集成爆炸箔起爆器性能的影响[J]. 含能材料, 2018, 26(3): 273-278.  
CHEN Kai, XU Cong, ZHU Peng, et al. Effect of barrel and multilayer flyer on the performances of micro chip exploding foil initiator[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(3): 273-278.
- [2] 房旷, 陈清畴, 付秋波, 等. 集成爆炸箔起爆器的制备和飞片驱动能力表征[J]. 含能材料, 2016, 24(9): 892-897.  
FANG Kuang, CHEN Qing-chou, FU Qiu-bo, et al. Fabrica-



- tion and flyer driving capability characterisation of an integrated exploding foil initiator[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(9): 892-897.
- [3] 袁士伟,曾庆轩,冯长根,等.冲击片雷管飞片参数设计与估算[J]. *火工品*, 2003,(4): 18-20.
- YUAN Shi-wei, ZENG Qing-xuan, FENG Chang-gen, et al. The designing and estimating of flying plate parameters of slapper detonator[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2003,(4):18-20.
- [4] Morris C J, Marya 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.
- [5] 黄娜,唐洪佩,黄寅生,等.冲击片雷管爆炸箔的制备与电爆性能[J]. *含能材料*, 2014, 22(4): 514-520.
- HUANG Na, TANG Hong-pei, HUANG Yin-sheng, et al. Preparation and electrical performance of exploding foil in slapper detonator[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(4): 514-520.
- [6] 王涛,曾庆轩,李明愉,等. Al/Ni反应多层膜的电爆炸及驱动性能研究[J]. *火工品*, 2016,(5): 1-5.
- WANG Tao, ZENG Qing-xuan, LI Ming-yu, et al. Explosion and flyer-driving performance of Al/Ni reactive multilayers[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2016,(5): 1-5.
- [7] ZHANG Yu-xin, JIANG Hong-chuan, ZHAO Xiao-hui, et al. Characteristics of the energetic microinitiator through integrating Al/Ninanomultilayers with Cu film bridge[J]. *Nanoscale Research Letters*, 38(12): 1-6.
- [8] 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 and Pyrotechnics*, 2016,(3): 5-8.
- [9] WANG Yao, SUN Xiu-juan, JIANG Hong-chuan, et al. Investigation of electrically heated exploding foils in reactive Al/Ni multilayer [J]. *Propellants Explos. Pyrotech.*, 2018, 43: 923-928.
- [10] WU Dong-fang, TAN Qing-qing, HU Li-chong. Shape-controlled synthesis of Cu-Ni nanocrystals[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, 206(1): 150-157.
- [11] FU Zheng-rong, ZHANG Zheng, MENG Li-fang, et al. Effect of strain rate on mechanical properties of Cu/Ni multilayered composites processed by electrodeposition [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2018, 726(1): 154-159.
- [12] WANG Chuan-jie, WANG Hai-yang, GENG Fang-fang, et al. Interactive effects of microstructure and interface on tensile deformation behaviors of Cu/Ni clad foils[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2018, 714-(1): 14-24.
- [13] 赵小侠,罗文峰,张相武,等.基于LIBS技术的黄铜等离子体特征参量的研究[J]. *激光技术*, 2013, 37(1): 93-96.
- ZHAO Xiao-xia, LUO Wen-feng, ZHANG Xiang-wu, et al. Measurement of brass plasma parameters based on laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(1): 93-96.
- [14] 傅院霞,徐丽,葛立新,等.激光诱导镍等离子体电子温度的时间演化特性[J]. *蚌埠学院学报*, 2016, 5(5): 30-37.
- FU Yuan-xia, XU Li, GE Li-xin, et al. Investigation on the time evolution of the electron temperature in laser-induced Ni plasma[J]. *Journal of Bengbu University*, 2016, 5(5): 30-37.
- [15] 李澜,陈冠英,张树东,等.激光能量对激光诱导Cu等离子体特征辐射强度,电子温度的影响[J]. *原子与分子物理学报*, 2003, 20(3): 343-346.
- LI Lan, CHEN Guan-ying, ZHANG Shu-dong, et al. Effects of laser energy on electron temperature and the emission spectra intensities of copper plasma ablated with laser [J]. *Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2003, 20(3): 343-346.
- [16] Calzada M D, Moisan M, Gamero A, et al. Experimental investigation and characterization of the departure from local thermodynamic equilibrium along a surface-wave-sustained discharge at atmospheric pressure[J]. *Journal of applied physics*, 1996, 80(1): 46-55.
- [17] NIST atomic spectra database[OL], <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>, 2018.

## Plasma Spectrograph and Driving Flyer Properties of Electrically Exploded Ni/Cu Multilayers

YANG Shuang, SUN Xiu-juan, WANG Wan-jun, FU Qiu-bo

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** To explore the exploding mechanism of composite multilayers, the properties of Ni/Cu multilayer exploding foil were studied. Ni/Cu composite multilayers (modulation period 200 nm/300 nm and 300 nm/400 nm, respectively), pure Cu and Ni films with the same thickness were prepared by electrochemical deposition. The plasma emission spectroscopy was measured. Under different discharge current conditions, the electron temperature of electrically exploded plasma of Ni/Cu composite multilayers with different structures, pure Cu and Ni films was calculated, respectively. After matching barrels and flyers with exploding foils, the velocity of flyer driven by different exploding foils was measured by PDV method. The performance of the exploding foils driving flyer under different discharge current conditions were obtained. The results show the plasma emission spectroscopy intensity and electron temperature of  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$  and  $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$  is higher than pure Cu and Ni at discharge current of 2.5 kA, indicating the Ni/Cu composites have higher electrically exploding energy density at the same condition. The Ni in Ni/Cu composites promotes the plasma to push flyer forward, resulting in the accelerating time and final velocity of flyer driven by  $(\text{Ni}_{200}\text{Cu}_{300})_8$  and  $(\text{Ni}_{300}\text{Cu}_{400})_5\text{Ni}_{300}$  are both higher than those of flyer driven by pure Cu.

**Key words:** Ni/Cu multilayers; electrically plasma; spectrograph; flyer

**CLC number:** TJ45

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018346

(责编:姜梅)