

文章编号: 1003-1480 (2024) 05-0078-06

不同镀膜方法对铜爆炸箔电爆炸性能及成本的影响

杨德宇¹, 徐聪², 陈航¹, 王瀚涛¹, 代波¹, 任勇¹

(1.西南科技大学 环境友好能源材料国家重点实验室, 四川 绵阳, 621010; 2.西南科技大学 国防科技学院, 四川 绵阳, 621010)

摘要: 为满足不同应用场景对爆炸箔电爆炸性能和成本的要求, 对比研究了磁控溅射法、电子束蒸发法和电镀法3种不同镀膜技术制备的铜爆炸箔。通过X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)对爆炸箔的物相和微观结构进行了表征, 同时分析不同制备方法对电阻和电爆炸性能的影响。研究表明: 3种方法均能制备出纯相铜薄膜, 且都有较好的结晶度。电爆炸试验结果显示: 2000V时, 磁控溅射法制备的爆炸箔爆发功率分别是电子束蒸发法和电镀法的1.24倍和4.05倍。成本分析表明: 磁控溅射法由于对设备和材料的要求高, 成本最高; 电子束蒸发法次之, 而电镀法成本最低。综合考虑性能和成本, 建议航空航天采用磁控溅射法, 武器弹药采用电子束蒸发法, 民用爆破采用电镀法。

关键词: 爆炸箔; 磁控溅射; 电子束蒸发; 电镀; 电爆炸性能; 成本

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.05.012

Effect of Different Coating Methods on the Electric Explosive Performance and Cost of Copper Explosive Foils

YANG De-yu¹, XU Cong², CHEN Hang¹, WANG Han-tao¹, DAI Bo¹, REN Yong¹

(1.State Key Laboratory of Environment-friendly Energy Materials, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621010; 2.National Defense Science and Technology Institute, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621010)

Abstract: In order to meet the requirements of electric explosive performance and cost of explosive foil, copper explosive foils prepared by magnetron sputtering, electron beam evaporation and electroplating methods were studied. The phase and microstructure of the explosive foils were characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM) and atomic force microscope (AFM), and the effects on resistance and electric explosive performance by different preparation methods were analyzed. The results indicate that all three methods can produce pure-phase copper films with good crystallinity. The electric explosion tests reveal that at a voltage of 2000 V, the burst power of the explosive foil prepared by magnetron sputtering is 1.24 times and 4.05 times that of those prepared by electron beam evaporation and electroplating, respectively. Cost analysis shows that magnetron sputtering, due to its high equipment and material requirements, has the highest cost; electron beam evaporation method is the next most costly, and electroplating method has the lowest cost. Considering both performance and cost, it is recommended that the aerospace field should use magnetron sputtering, the armaments field should use electron beam evaporation, and the general civil blasting field should use electroplating.

Key words: Explosive foil; Magnetron sputtering; Electron beam evaporation; Electroplating; Electric explosive performance; Cost

冲击片雷管也称为爆炸箔起爆器, 主要由背板 (反射片)、爆炸桥箔、飞片、加速膛以及药柱组成。

收稿日期: 2024-07-08

作者简介: 杨德宇 (1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事新型火工品研究。

通讯作者: 任勇 (1981-), 男, 研究员, 主要从事微加工技术研究。

基金项目: 四川省科技计划杰出青年科学基金项目 (2024NSFJQ0064)。

引用本文: 杨德宇, 徐聪, 陈航, 等. 不同镀膜方法对铜爆炸箔电爆炸性能及成本的影响[J]. 火工品, 2024(5):78-83.

其作用过程为爆炸箔在脉冲大电流的作用下爆炸产生高温高压等离子体,驱动飞片高速撞击药柱,从而起爆炸药^[1]。爆炸箔作为冲击片雷管始发部件的换能元件,其性能的优劣直接影响着冲击片雷管的作用效果^[2],因此,国内外学者对其电爆炸性能开展了大量的研究^[3-11]。然而在不同的应用场景,对冲击片雷管的性能要求也不同。在武器弹药领域,要求冲击片雷管能应对各种恶劣的环境,且要实现火工品的高可靠、高瞬发、低功耗能量^[12];在航空航天领域,冲击片雷管要做到小型化、集成化、规范化^[13];而在民用爆破领域,主要考虑其经济性和实用性^[14]。

在众多影响爆炸箔性能的因素中,镀膜方法的选择尤为关键。不同的镀膜技术不仅影响爆炸箔的物理和化学性质,还直接关系到生产成本和工艺的复杂性。因此,本文分别采用磁控溅射法、电子束蒸发法以及电镀法制备爆炸箔铜膜;再通过光刻和湿法刻蚀工艺制备爆炸箔;然后将制备的爆炸箔通过电阻测试、X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)以及原子力显微镜(AFM)对爆炸箔的物相及结构进行表征;最后通过自主搭建的电爆炸测试平台测试各爆炸箔的电爆性能并进行对比。

1 实验

1.1 铜膜制备

首先,将32 mm×32 mm厚度为1 mm的ZTA陶瓷反射片先后使用丙酮、超纯水、酒精各超声清洗15 min,然后用氮气吹干。为去除陶瓷反射片表面微小的污染物并增加爆炸箔与陶瓷反射片的结合力,再将反射片表面用离子刻蚀进行轰击,时间为2 min。

(1)利用JGP450A磁控溅射设备制备铜薄膜。在溅射过程中,本底真空度小于 3×10^{-4} Pa,工作气体为高纯氩气,工作压强为0.5 Pa,溅射功率为120 W,膜厚为3 μm。

(2)利用ZZS500-4/G型箱式真空镀膜机进行电子束蒸发镀膜。镀膜开始前,先使用离子源轰击陶瓷反射片,速率为3 A/s,时间为25 min,其目的是为

了增加结合力;离子源轰击结束后,关闭离子源,保持速率在9~10 A/s,开始镀膜,腔体温度为107℃,膜厚为3 μm。

(3)利用JGP450A磁控溅射设备在陶瓷反射片上溅射200 nm厚的铜膜作为导电层,然后再利用电镀设备进行电镀铜膜。电镀过程中,根据陶瓷反射片的面积,计算得到所需电流为0.153 6 A,时间为20 min,膜厚为3 μm。

1.2 桥箔制备

镀膜完成后,进行桥箔的制备。爆炸箔主要由桥带和桥区两部分组成,桥带主要起连接桥区和大电流的传输作用;桥区可以实现金属的汽化和爆炸,形成快速膨胀的等离子体。目前,微结构爆炸箔桥区形状设计主要包括方形、S形、倒V形等,本次设计采用最常用的X形桥区结构,整体呈领结形。通过微加工工艺,主要步骤依次为:匀胶、前烘、光刻、后烘、显影、湿法腐蚀等,制备出桥箔。尺寸设计为0.31 mm(L)×0.42 mm(W)×3 μm(d)。

2 样品表征

2.1 X射线衍射分析

利用日本Rigaku公司生产的SmartLab型X射线衍射仪,对制备的不同爆炸箔样品进行扫描,得到如图1所示的衍射图谱。

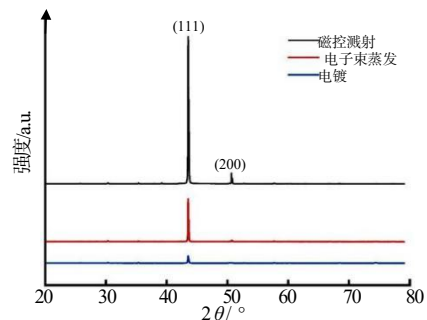


图1 不同镀膜方式得到的爆炸箔XRD图

Fig.1 XRD of explosive foil obtained by different coating modes

从图1中可以看出,3种薄膜的XRD图 2θ 值在 43.5° 左右均出现最强峰Cu(111)晶面衍射峰,而在 50.6° 左右出现次强峰Cu(200)晶面衍射峰,说明3种薄膜都有较好的结晶度。从磁控溅射、电子束蒸发

到电镀,峰强依次减弱,说明其对应的铜膜结晶性依次减弱。其中磁控溅射铜箔的Cu(111)晶面择优取向程度最高,形成较强的Cu(111)结构。在Cu(111)晶面上,磁控溅射铜箔的衍射峰半峰宽更宽。根据谢乐(Scherrer)公式^[15]:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

式(1)中: K 为谢乐常数,0.89; λ 为衍射波长,1.5406 Å; β 为实测样品衍射峰半峰高; θ 为布拉格衍射角,带入数值计算得到3种薄膜的晶粒尺寸分别为39.90,35.14,44.72 nm,即表明电子束蒸发铜箔的晶粒尺寸更小。晶粒尺寸减小,薄膜比表面积增大,表面自由能增大,材料再融化所需的能量就降低,也更有利于铜箔的引爆。

2.2 薄膜表面形貌分析

采用Sigma300型场发射扫描电子显微镜对爆炸箔进行微观形貌分析,结果如图2所示。

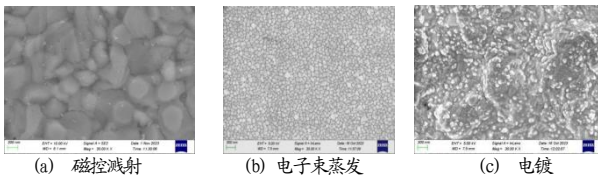


图2 不同镀膜方式得到的铜膜SEM图

Fig.2 The SEM diagram of the copper film obtained by different coating modes

扫描电镜结果显示,在放大相同倍数条件下,电子束蒸发薄膜颗粒度明显小于其他两类,且薄膜颗粒较为均匀。相比之下,磁控溅射薄膜颗粒稍大,而电镀薄膜颗粒为岛状,呈无序分布。

采用SEIKO-SPI3800型原子力显微镜表征薄膜的表面粗糙度,得到如图3所示的铜薄膜AFM图。

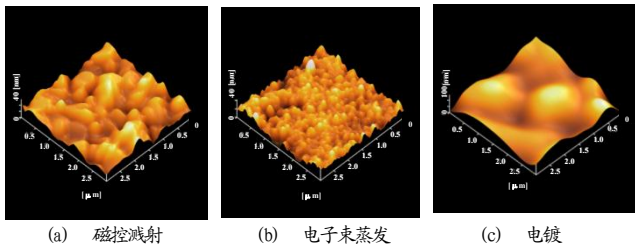


图3 不同镀膜方式得到的铜膜AFM图

Fig.3 The AFM diagram of the copper film obtained by different coating modes

依据SEM和AFM获得的表面形貌图像,通过数据处理软件计算可得镀膜方式为磁控溅射、电子束蒸

发和电镀对应的铜膜表面粗糙度分别为7.357,3.963,19.300 nm,即电子束蒸发镀膜得到的铜膜表面粗糙度最小,电镀镀膜得到的铜膜表面粗糙度最大,磁控溅射镀膜得到的铜膜表面粗糙度介于两者之间。这是由于不同的薄膜晶粒尺寸不同,且晶粒之间的距离也不同导致的。从图3还可以看出,3种薄膜都具有孔洞、裂纹、沟槽等缺陷。

2.3 电阻测试

采用FT-341型双电四探针方阻电阻率测试仪测试爆炸箔的电阻,测试结果如表1所示。

表1 不同镀膜方式得到样品的方块电阻

Tab.1 The square resistance of the sample obtained by different coating modes

镀膜方式	方块电阻/mΩ	爆炸箔桥区电阻/mΩ
磁控溅射	5.71	46.63
电子束蒸发	5.32	34.52
电镀	5.03	24.18

从表1可以看出,无论是方块电阻还是爆炸箔桥区电阻,磁控溅射镀膜得到的样品数值都是最大,电镀镀膜得到的样品数值都是最小,而电子束蒸发镀膜得到的样品数值介于两者之间。这是由于不同镀膜方式得到的铜膜晶粒大小和缺陷等不同,导致晶界对电子造成的散射、电子迁移率等不同,所以其电阻也就不同。而当起爆回路参数固定以后,桥箔电阻对飞片速度的影响呈正比例,即相同尺寸的桥箔,其电阻越大,驱动飞片能力越强,飞片的终态速度也会越大^[16]。

3 电爆炸性能测试

3.1 试验装置

电爆炸性能试验装置如图4所示,主要包括高压脉冲功率源、爆炸箔起爆装置以及信号采集装置。

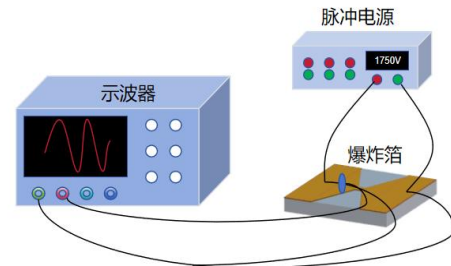


图4 电爆炸测试系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of the electric explosion test system

图4中高压脉冲功率源可提供0~2600V的高压,为0.18 μF电容器充电,同时可为爆炸箔起爆装置提

供脉冲高压。信号采集装置主要包括电压、电流信号采集装置以及数据存储装置，其中电压采用 Agilent 10076B 型高压探头采集，电流采用 PINTECHDK-3500 型柔性电流探头采集，采集到的电压、电流信号用 Tektronix-MDO4104C 型示波器记录储存。

3.2 起爆回路电阻、电感测试

为确保试验安全性以及避免仪器损坏，在起爆回路中引出了部分电缆，但是电缆的引入增加了起爆回路的总电感和总电阻，使得功率源输出能量部分浪费在起爆回路中，从而导致系统能量利用率降低。所以，在测试电爆炸参数前对起爆回路短接，得到在充电电压为 1 750 V、电容为 0.18 μF 时回路电流随时间的变化曲线，如图 5 所示。

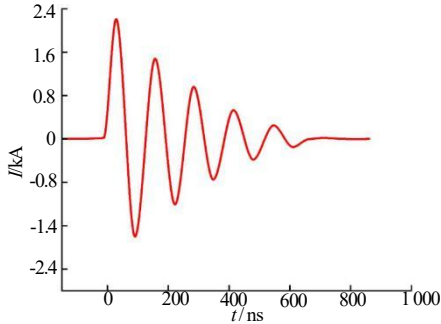


图 5 起爆回路短路电流曲线

Fig.5 Short-circuit current curve of the burst circuit

由图 5 可以看出脉冲功率源短路放电时，电流至少包含 5 个等间隔振幅逐渐减小的波形，电流曲线满足美军标 MIL-DTL-23659D。根据 R-L-C 电路放电理论推导出计算公式^[17]：

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

$$R = \frac{2L}{T} \times \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \quad (3)$$

式 (2) ~ (3) 中：L 为电感，nH；T 为电流曲线震荡周期，μs；C 为电容，μF；I₁、I₂ 为初始 2 个电流峰值，A；R 为回路电阻，mΩ。根据公式 (2) ~ (3) 及短路电流曲线，计算得到回路总电感为 432 nH，总电阻为 145 mΩ。

3.3 电爆炸曲线测试

低压起爆时，各类桥箔电爆参数变化量较小，输入的能量不能使桥箔充分起爆^[18]。为使研究满足不同

电压起爆要求并结合设备实际情况，选择相对高压起爆，即 1 500，1 750，2 000 V，对 3 组样品进行电爆炸测试，得到电流、电压随时间的变化曲线，如图 6 所示。

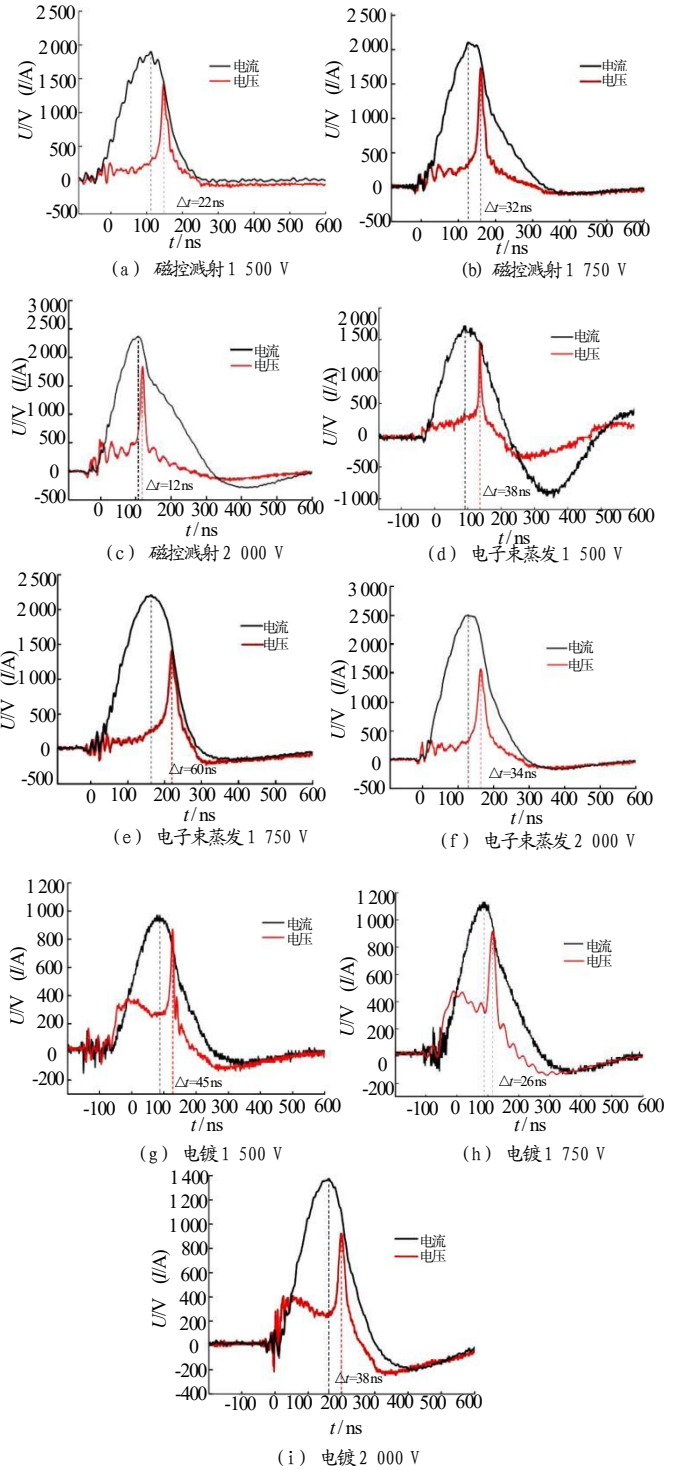


图 6 不同爆炸箔在不同充电电压下的伏安特性曲线
Fig.6 Voltammeter characteristic curves of different explosive foils under different charging voltages

定义峰值电压时刻为爆炸箔爆发时刻，则爆发功率、沉积能量以及能量利用率的计算公式^[19]：

$$P_b = U_b \times I_b \quad (4)$$

$$W = \int_0^{t_b} U \cdot Idt \quad (5)$$

$$\eta = \frac{2W}{CU_0^2} \quad (6)$$

式(4)~(6)中： P_b 为爆发功率，kW； U_b 为峰值电压，V； I_b 为爆发电流，A； W 为沉积能量，mJ； η 为能量利用率； C 为电容， μF ； U_0 为充电电压，V。结合公式(4)~(6)计算得到Cu爆炸箔在不同充电电压下的电爆炸参数，如表2所示。

表2 爆炸箔在不同充电电压下的电爆炸性能参数

Tab.2 Electric explosive performance parameters of the explosive foil at different charging voltages

镀膜方式	充电电压 U_0/V	峰值电流 I/A	峰值电压 U_b/V	爆发电流 I_b/A	爆发时刻 t_b/ns	电流密度 $J_b/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	爆发功率 P_b/kW	沉积能量 W/mJ	能量利用率 $\eta/\%$
磁控溅射	1 500	1 920	1 460	1 440	148	1.14×10^8	2 102.4	61.25	30.25
	1 750	2 120	1 730	1 880	160	1.49×10^8	3 252.4	79.32	28.78
	2 000	2 410	1 850	2 230	119	1.77×10^8	4 125.5	100.29	27.85
电子束蒸发	1 500	1 720	1 390	1 380	128	1.09×10^8	1 918.2	60.54	29.89
	1 750	2 220	1 410	1 520	219	1.20×10^8	2 143.2	81.33	29.51
	2 000	2 540	1 570	2 120	164	1.68×10^8	3 328.4	103.73	28.81
电镀	1 500	970	872	770	120	6.11×10^7	671.4	29.92	14.78
	1 750	1 130	916	950	115	7.54×10^7	870.2	30.30	10.99
	2 000	1 373	920	1 107	199	8.79×10^7	1 018.4	36.35	10.10

从表2中可以看出，3类爆炸箔的电流密度都大于 $1 \times 10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，这个数值是判断导体是否发生电爆炸的判据：当 $J > 10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时，导体发生电爆炸^[20]。所以3类爆炸箔都发生了电爆炸。此外，随着充电电压的升高，峰值电流、峰值电压、爆发电流均升高，且3组样品的爆发功率、沉积能量也有所升高。2 000 V时， $U_{b\text{磁控}}$ 是 $U_{b\text{蒸发}}$ 的1.18倍，是 $U_{b\text{电镀}}$ 的2.01倍； $I_{b\text{磁控}}$ 是 $I_{b\text{蒸发}}$ 的1.05倍，是 $I_{b\text{电镀}}$ 的2.01倍； $P_{b\text{磁控}}$ 是 $P_{b\text{蒸发}}$ 的1.24倍，是 $P_{b\text{电镀}}$ 的4.05倍。而2 000 V时， $W_{\text{磁控}}$ 是 $W_{\text{蒸发}}$ 的0.97倍，是 $W_{\text{电镀}}$ 的2.76倍，这是由于电子束蒸发样品的爆发时刻较磁控溅射样品有延后，导致电子束蒸发样品的沉积能量及能量利用率高于磁控溅射样品。所以，电子束蒸发和磁控溅射得到的样品测试结果明显优于电镀的样品，而磁控溅射的测试结果略优于电子束蒸发。从成本来看，磁控溅射设备要求高真空环境，而且还需要纯度高于99.9%的靶材，成本最高；电子束蒸发虽然也要求高真空环境，但是对蒸发材料铜的要求相对较低，成本次之；而电镀无论是对材料还是环境的要求，都低于磁控溅射和电子束蒸发，故成本最低。

4 结论

(1) 本研究采用磁控溅射法、电子束蒸发法以及电镀法制备铜膜，再利用光刻、湿法刻蚀等工艺制备膜厚 $3 \mu\text{m}$ 的爆炸箔。通过电阻测试、X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)以及原子力显微镜(AFM)对爆炸箔的物相及结构进行表征。结果表明3种镀膜方法均制备出纯相铜薄膜，且XRD图谱显示在 2θ 约 43.5° 处均出现最强峰Cu(111)晶面衍射峰。

(2) 通过自主搭建的电爆炸测试平台对3种镀膜方法制备的爆炸箔进行电爆炸性能测试，得出2 000 V时，磁控溅射样品的峰值电压是电子束蒸发的1.18倍，是电镀的2.01倍；磁控溅射样品的爆发电流是电子束蒸发的1.05倍，是电镀的2.01倍；磁控溅射样品的爆发功率是电子束蒸发的1.24倍，是电镀的4.05倍；磁控溅射样品的沉积能量是电子束蒸发的0.97倍，是电镀的2.76倍。

(3) 根据电爆性能测试结果，可知电子束蒸发

和磁控溅射得到的样品明显优于电镀的样品,而磁控溅射的样品略优于电子束蒸发。结合成本,航空航天建议采用磁控溅射法,武器弹药建议采用电子束蒸发法,一般的民用爆破建议采用电镀法。

参考文献:

- [1] 陈清畴. 冲击片雷管作用特征及影响规律研究[D].北京:北京理工大学,2019.
- [2] 张旭,叶文,吕晓峰. 导弹火工品及其安全性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
- [3] 周密,张晶鑫,同红海,等. 铜箔厚度对爆炸箔起爆性能影响规律研究[J].火工品,2019(4):14-18.
- [4] 付秋波,蒋小华,郭菲,等. 爆炸箔尺寸对飞片速度的影响[J]. 兵工学报,2010,31(04):434-436.
- [5] 王窈. 脉冲能量作用下 Al/Ni 含能多层膜爆炸特性及应用研究[D].成都:电子科技大学,2022.
- [6] 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(06): 456-464.
- [7] 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.
- [8] 张宇新. 基于 MEMS 技术的薄膜换能元及其电爆性能研究 [D]. 成都:电子科技大学,2020.
- [9] J. C .,K. K . A Numerical model and analysis of microscale explosive initiator integrated with thin-film reactive bridge of nanoscale aluminum/nickel multilayers[J].Journal of Engineering Thermophysics,2022,31(1):111-131.
- [10] Foadian F ,Soltanieh M ,Adeli M , et al. The kinetics of TiAl₃ formation in explosively welded Ti-Al multilayers during heat treatment[J].Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(5):2 931-2 937.
- [11] 郭晋. MEMS 冲击片雷管制备及性能研究[D].太原: 中北大学, 2023.
- [12] 钟杰华,姜依志,张沂. 新型火工品技术在未来武器系统的应用分析[J].科技创新与应用,2018(13):33-34,37.
- [13] 唐科,陈楷,宋乾强,等. 航天运载火箭高安全火工起爆技术发展及启示[J].兵器装备工程学报,2022,43(05):31-39.
- [14] 王波,董云龙,陈召锋,等. 民用爆炸物品数字式起爆系统末端管控设备的研究[J].采矿技术,2020,20(06): 192-193, 198.
- [15] 曾庆轩,袁世伟,罗诚沐,等. 爆炸箔起爆系统初始电阻对爆发电流和飞片速度影响的数值模拟[J].火工品,2002 (3): 43-45.
- [16] 胡赓祥,蔡珣,戎咏华. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社,2010.
- [17] 陈昌渔,王昌长,高胜友. 高电压试验技术[M].北京: 清华大学出版社,2017.
- [18] 周全,陈航,代波,等. 靶材对铜爆炸箔电爆炸性能一致性的影响[J].兵器装备工程学报,2022,43(06):155-161.
- [19] 李思宇,董晓芬,王云鹏,等. TiW/Ni/Au 爆炸箔制备及性能研究[J].兵工学报,2023,44(12):3 826-3 835.
- [20] 王莹. 电爆炸导体及其应用[J].爆炸与冲击,1986(2):184-192.