

文章编号: 1003-1480 (2023) 05-0011-07

Al基含能薄膜设计及电爆性能研究

李思宇¹, 董晓芬¹, 王云鹏¹, 李晨铭¹, 张丽莎², 王端¹

(1. 中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原, 030051; 2. 西北工业大学, 陕西 西安, 710072)

摘要: 为探究不同材料 Al 基含能薄膜在低能爆炸箔起爆系统中的电爆性能, 对 Al 基含能薄膜的厚度、桥区形状和尺寸进行了仿真设计, 优选出最佳桥区形状, 在此基础上通过电爆试验及高速摄影对 Al/Ni、Al/Ti、Al/Cu、Al/CuO 4 种 Al 基含能薄膜的电爆性能及发火过程进行了对比研究。结果表明: Al/Ti 薄膜综合性能最佳, 具有较大的沉积能量、能量利用率和桥区电流密度, 同时最佳起爆电压适中、火焰高度较高、持续时间较长; Al/Ni 薄膜所需最佳起爆电压最小, 但作用能力较差; Al/CuO 薄膜具有最佳作用能力, 但所需最佳起爆电压较大; Al/Cu 薄膜的电爆性能最不突出。

关键词: Al 基含能薄膜; COMSOL 仿真; 电爆性能测试; 高速摄影

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2023.05.003

Design and Electrical Explosion Performance Study of Al-based Energetic Thin Films

LI Si-yu¹, DONG Xiao-fen¹, WANG Yun-peng¹, LI Chen-ming¹, ZHANG Li-sha², WANG Duan¹

(1. School of Environmental and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

Abstract: In order to explore the electric explosion performance of different materials of Al based energetic thin films in low-energy explosive foil initiation system, the thickness, bridge shape and size of Al based energetic thin films were designed through simulation and the optimal bridge shape was selected. On this basis, a comparative study was conducted on the electrical explosion performance and ignition process of four Al based energetic thin films including Al/Ni, Al/Ti, Al/Cu, and Al/CuO through electrical explosion test and high-speed photography. The study shows that the Al/Ti film has the best overall performance with larger deposition energy, energy utilisation and bridge current density, as well as moderate optimum initiation voltage, higher flame height and longer flame duration; The optimum initiation voltage of Al/Ni film is the smallest, but its action capability is relatively poor; The Al/CuO film has the best action capability, but the required optimum initiation voltage is relatively high; The electrical explosion performance of Al/Cu film is the least aggressive.

Key words: Al based energetic film; COMSOL simulation; Electric explosion performance test; High speed photography

含能薄膜在电能和化学能的共同作用下, 可以实现更高能量的输出, 从而增强换能元的点火能力, 提升火工品的发火可靠性及安全性。根据化学反应类型, 含能薄膜可以分为 2 类: 可以发生氧化还原反应的金属/氧化物含能薄膜, 如 Al/CuO^[1]、Al/Fe₂O₃^[2]和 Al/MoO₃^[3]等; 可以发生合金化反应的金属/金属含能

薄膜, 如 Al/Ni^[4]、Al/Ti^[5]和 B/Ti^[6]等。含能薄膜材料中, Al、Ni、Ti、Cu 和 CuO 因具有原材料易得、价格便宜、无毒以及工艺成熟等优势而得到广泛研究。杨程等^[7]采用磁控溅射法制备了不同调制周期的多层 Al/Ti 纳米含能桥膜, 并对其电爆性能进行了测试。王窃等^[8]采用 MEMS 工艺制备了 Al/Ni 复合爆炸箔,

收稿日期: 2023-04-20

作者简介: 李思宇 (1999-), 男, 在读硕士研究生, 从事先进火工品技术研究。

通讯作者: 王端 (1973-), 男, 研究员级高级工程师, 从事先进火工品技术研究。

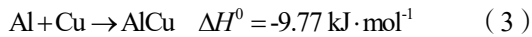
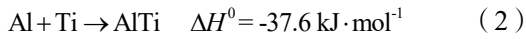
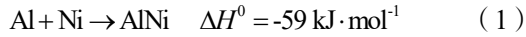
在 4 kV 充电电压下对其电爆性能进行了测试。倪德彬等^[9]采用磁控溅射技术制备了不同调制周期的纳米 Al/CuO 含能复合薄膜, 测试了其在不同电压下的电爆特性。然而, 现有研究大多局限于小电容高电压或大电容低电压, 而对于低能爆炸箔起爆系统中含能薄膜的电爆性能未见研究报道。

为了探究不同材料 Al 基含能薄膜在低能爆炸箔起爆系统中的电爆性能, 本文对 Al 基含能薄膜的厚度、桥区形状和尺寸进行了仿真设计, 优选出最佳桥区形状, 在此基础上通过电爆试验及高速摄影对 Al/Ni、Al/Ti、Al/Cu、Al/CuO 4 种 Al 基含能薄膜的沉积能量、能量利用率、桥区电流密度及电爆发火过程进行了对比研究, 以期为低能爆炸箔起爆系统中含能薄膜的设计及应用提供参考。

1 含能薄膜设计

1.1 薄膜厚度设计

Al/Ni、Al/Ti、Al/Cu、Al/CuO 含能薄膜在电加热时能激烈反应, 发生燃烧或爆炸, 释放出大量的热。其化学反应式如下:



含能薄膜中 2 种材料的原子比越接近其化学反应计量比, 则反应的进行就越充分, 放出的热量也越接近理论值。因此, 可以通过化学反应计量比推算含能薄膜中 2 种材料薄膜厚度的调制比:

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{m_1 \rho_2}{m_2 \rho_1} = \lambda \frac{M_1 \rho_2}{M_2 \rho_1} \quad (5)$$

式(5)中: H_1 、 m_1 、 M_1 、 ρ_1 分别为材料 1 的薄膜厚度、质量、摩尔质量、密度; H_2 、 m_2 、 M_2 、 ρ_2 分别为材料 2 的薄膜厚度、质量、摩尔质量、密度; λ 为材料 1 和材料 2 的化学反应计量比。计算得到 Al/Ni、Al/Ti、Al/Cu、Al/CuO 含能薄膜中 2 种材料薄膜厚度的调制比分别约为 3:2、1:1、3:2、2:3。为便于对比, 4 种含能薄膜的总厚度均设计为 3 μm , 每个调制周期设置为 1 μm , 具体参数如表 1 所示。

表 1 含能薄膜厚度设计

Tab.1 Thickness design of energetic thin films

薄膜材料	Al 薄膜厚度/nm	其他材料厚度/nm	调制比	调制周期/ μm	调制周期数	总厚度/ μm
Al/Ni	600	400	3:2	1	3	3
Al/Ti	500	500	1:1	1	3	3
Al/Cu	600	400	3:2	1	3	3
Al/CuO	400	600	2:3	1	3	3

1.2 桥区形状设计

1.2.1 桥区形状设计

含能薄膜桥区需要升温至一定温度才能产生膜层间反应, 在此之前, 其温度演化过程主要取决于桥区形状, 受薄膜材料的影响不大。因此, 为探究桥区形状对含能薄膜温度分布及演化的影响, 设计了 4 种不同桥区形状的含能薄膜, 薄膜材料均为单种金属材料 Al, 如图 1 所示。由图 1 可见, A 形桥区为正方形, 边长为 0.250 mm; B、C、D 形桥区均在 A 形桥区基础上保持边长为 0.250 mm 不变, 通过改变桥区中心结构而来。其中, B 形桥区中心宽度缩小至 0.200 mm, 为双曲线结构, 曲线圆心位于桥区中心线上, 曲线半径为 0.125 mm; C 形桥区中心宽度扩大至 0.300 mm, 为双曲线结构, 曲线圆心位于桥区中心线上, 曲线半径为 0.125 mm; D 形桥区中心宽度扩大至 0.300 mm, 突出部分为三角形结构, 桥区两侧凸出部分等高。

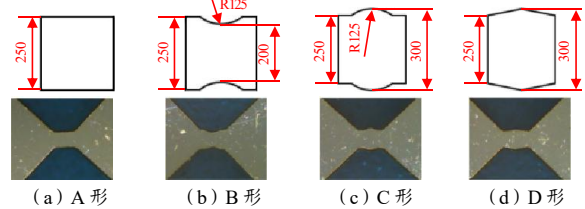


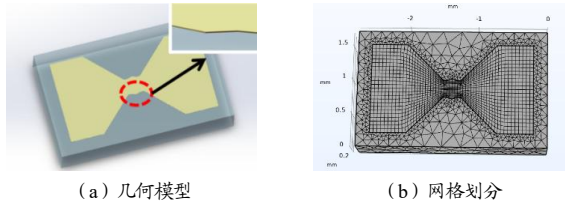
图 1 金属薄膜桥区形状及尺寸 (单位: μm)

Fig.1 Bridge area shape and size of the metal film

1.2.2 模型建立及网格划分

对 4 种桥形含能薄膜的电热性能和电流密度进行仿真, 优选出最佳桥区形状。采用 COMSOL 软件建模, 结合实际条件做出如下假设: 假设金属薄膜产生的热量以热传导的方式在金属薄膜和玻璃基底间传递, 向空气的散热仅考虑对流传热, 并且忽略辐射传热的影响; 假设电流在金属薄膜中流动时, 其电学性能不受温度变化的影响, 并且不考虑薄膜相变等反应过程; 假设玻璃基底的电阻率、密度、热传导率及比热容等物性参数为恒定值; 假设金属薄膜的密度、热传导率及比热容为恒定值。同时, 为便于建模, 假设金属薄膜沉积于玻璃基底正中间, 基底厚度为 0.5

mm。建立的 Al 基金属薄膜几何模型如图 2(a)所示,其材料参数见表 2。由于金属薄膜厚度(3 μm)与玻璃基底厚度(0.5 mm)相差较大,为减少计算量,采用定制网格的方式在金属薄膜平面上构建扫掠网,将金属薄膜部分网格划分为极细化网格,玻璃基底部分网格划分为自由四面体网格,如图 2(b)所示。



(a) 几何模型 (b) 网格划分

图 2 金属薄膜几何模型及网格划分

Fig.2 Geometric model and mesh generation of metal thin film

表 2 仿真材料参数

Tab.2 Simulation material parameters					
材料	密度 $\rho \times 10^3$ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热率 λ /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热容 C /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	电导率 /($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	熔点 /K
Al	2.70	237	896.29	3.774×10^7	993
玻璃	2.21	1.340	892	1×10^{-14}	2 073

1.2.3 仿真输入电爆电压曲线

对 4 种桥形的 Al 基金属薄膜进行伏安特性试验,获取其电爆电压曲线及薄膜对应的爆炸情况。试验时充电电容为 0.1 μF,输入电压为 400 ~ 900 V,梯度为 100 V。试验结果表明桥区完全爆炸时的输入电压为 800 V,选取此时 4 种桥形金属薄膜上施加的电爆电压曲线作为仿真输入的电爆电压曲线,如图 3 所示。

1.2.4 物理场选择

采用 COMSOL 软件中的电流和固体传热模块对金属薄膜电爆熔化前的温度演化过程进行仿真。其本质是求解瞬态传热方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p U \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-K \nabla T) = Q \quad (6)$$

式(6)中: ρ 为含能薄膜密度; C_p 为恒压热容; K 为导热系数; U 为速度场; Q 为热源。

电流场的求解域限定于金属薄膜区域,用于模拟金属薄膜中的电热产生以及薄膜与基底间的传热。通过全局定义插值函数导入电爆电压曲线,通过调用插值函数将实际电压加载至“电流”模块中的电势接口,求解金属薄膜电流密度和温度变化情况。固体传热发生于整个求解域,包括玻璃基底和金属薄膜。设定初始温度为室温 298 K,通过设定接地和电势对金属薄膜进行电压加载使其升温。由于金属薄膜能够迅速导

热,因此将其两端设置为恒温边界条件,金属薄膜与玻璃基底间设置为接触传热,其他界面均为热对流边界。在升温过程中,需考虑热对流造成的热量损失,取对流换热系数为 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

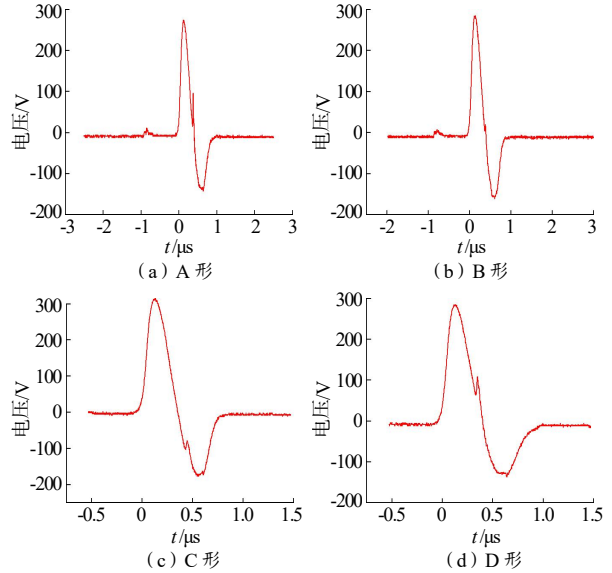


图 3 异形金属薄膜起爆电压曲线

Fig.3 Initiation voltage curve of irregular metal film

1.2.5 仿真结果

仿真得到 4 种桥形 Al 基金属薄膜温度随时间的演化过程,如图 4 ~ 5 所示。为便于对比,设置计算步长为 0.1 μs,且过程中不设置金属相变,因此温度会超过金属材料熔点。

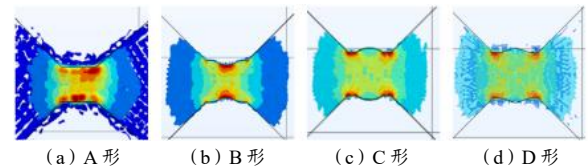


图 4 0.1 μs 时桥区温度分布云图

Fig.4 Cloud chart of temperature distribution in bridge area at 0.1 μs

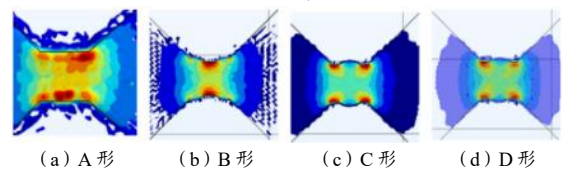


图 5 0.5 μs 时桥区温度分布云图

Fig.5 Cloud chart of temperature distribution in bridge area at 0.5 μs

由图 4 可见,在 0.1 μs 时,A、B、C、D 形桥区的最高温度分别为 1 020, 1 400, 1 330, 1 040 K。其中,A 形桥区温度最高点分布于桥翼与桥区的夹角处;B 形桥区温度最高点出现于桥区内凹圆弧的顶点处和桥翼与桥区的夹角处;C、D 形桥区温度分布较

均匀, 高温点均分布于桥区拐角处, 且桥区突出部分为桥区温度最低点。

由图 5 可见, $0.5 \mu\text{s}$ 时, A、B、C、D 形桥区最高温度分别升至 2 600, 5 100, 3 940, 3 090 K。虽然 A 形桥区的最高温度最低, 但其桥区温度分布最均匀, 除 3 个高点外, 其他位置温度相差不大; B 形桥区拐角处温度上升较为缓慢, 内凹圆顶点处温度上升较快, 且持续扩散, 由此可推断 B 形桥区爆炸时, 自桥区最窄处开始爆炸, 且温度提升速度最快; C、D 形桥区均从桥区四角开始扩散, 由此可推断 C、D 形桥区爆炸时, 自桥区四角开始爆炸, 扩散至正中央。

爆炸箔驱动飞片能力与电格尼能有关, 而桥区电流密度是计算电格尼能的重要参数, 桥区电流密度的提升可以有效增大爆炸箔驱动飞片的能力。 $0.5 \mu\text{s}$ 时 4 种形状桥区的电流密度流线图如图 6 所示。

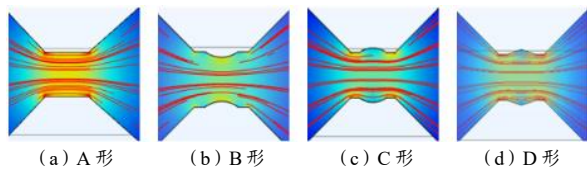


图 6 $0.5 \mu\text{s}$ 时桥区电流密度流线图

Fig.6 Current density streamline diagram of bridge area at $0.5 \mu\text{s}$

由图 6 可见, A 形桥区的电流密度分布最均匀, 相对集中于桥区两侧, 而桥区横向中心分布较稀疏; B 形桥区的电流密度在桥区横向中心分布较密集, 内凹区域分布较少, 桥区与桥翼拐角处分布密集; C 形桥区与 D 形桥区的电流密度流线相似, 但 D 形桥区电流密度在桥区中间突出部分的分布多于 C 形桥区, 因此可以推断 D 形桥区的电流密度分布更均匀。计算可知, A、B、C、D 形桥区在 $0.5 \mu\text{s}$ 时的电流密度分别为 7.17×10^{11} , 8.25×10^{11} , 2.69×10^{11} , $5.48 \times 10^{11} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

综上所述, A 形桥区的温度和桥区电流密度分布最均匀, 且桥区电流密度大小仅次于桥区电流密度分布最不均匀的 B 形桥区, 因此, A 形桥区最适合用于冲击片雷管。

1.2.6 仿真实验

4 种桥形 Al 基含能薄膜的电爆实物如图 7 所示。由图 7 可见, 在输入电压较低 (600 V) 时, 4 种形状桥区爆炸均不完全, 桥区熔融和电爆炸自温度升温最快点开始; 随着输入电压逐渐升高至 800 V, A 形桥

区电爆炸最为完全, B、C、D 桥形爆炸箔电爆炸后桥区均有金属残留, 将其与仿真结果对比, 发现实物电爆炸区域与仿真高温区域相同, 由此可以验证仿真结果的合理性, 选择 A 形桥区进行后续研究。

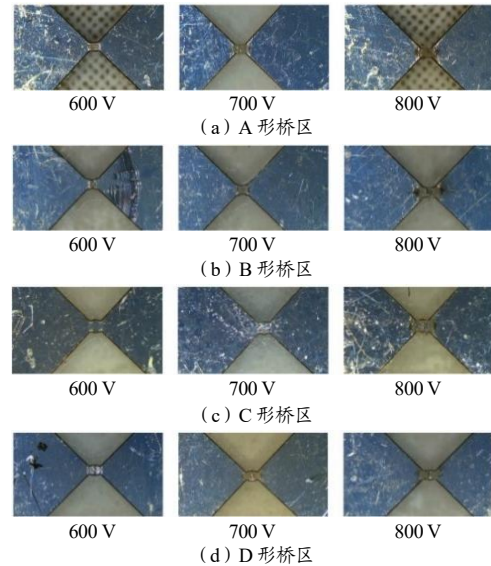


图 7 4 种结构金属薄膜电爆实物图

Fig.7 Physical drawing of metal thin film electric explosion with 4 structures

1.2.7 桥形优化

由于 A 形桥区拐角处存在温度集中现象, 会对含能薄膜电爆炸效果造成影响, 因此需要在 A 形桥区拐角处进行倒角处理。为探究倒角半径对含能薄膜温度分布的影响, 设置倒角半径分别为 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20 mm 和无倒角共 6 种状态, 对其温度分布进行仿真。为简化计算, 设置输入电压恒定为 10 V。仿真结果如图 8 所示。

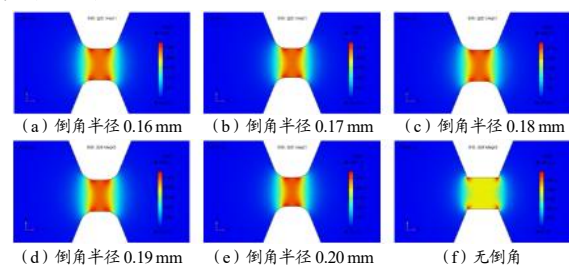


图 8 倒角影响分析

Fig.8 Chamfer impact analysis

由图 8 可知, 无倒角时, 桥区拐角处温度最高, 桥区中心温度最低, 且桥区拐角与桥区中心温度相差较大。倒角处理后改善了这一问题, 符合冲击片雷管起爆对桥箔桥区温度均匀变化的要求。对比 5 种倒角半径下的温度分布, 倒角半径为 0.19 mm 和 0.20 mm 时桥区温度大于等于 $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ 的面积小于其他 3 种倒

角情况,这可能会导致其在电加热阶段释放的能量小于其他3种倒角情况。而倒角半径为0.16 mm时桥区的外侧温度改变范围略大于倒角半径为0.17 mm和0.18 mm的情况,说明倒角半径为0.16 mm时桥区外侧消耗的能量大于倒角半径为0.17 mm和0.18 mm的情况,在相同的输入能量下不利于能量转换。倒角半径为0.17 mm和0.18 mm时的桥区温度最高值及变化范围相差不大,而倒角半径为0.17 mm时的电流密度略小于倒角半径为0.18 mm时的电流密度,故最佳倒角半径为0.17 mm左右。因此,最终确定桥区为方形桥(A形桥区),倒角半径为0.17 mm,其形状尺寸如图9所示。

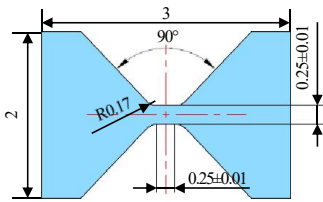


图9 含能薄膜桥区形状尺寸(单位:mm)

Fig.9 Shape and size of energetic thin film bridge area

2 试验

通过磁控溅射法溅射 Al/Ni、Al/Ti、Al/Cu、Al/CuO 含能薄膜,并采用光刻法刻蚀桥形,制备出4种材料的 Al 基含能薄膜样品,进行电爆炸性能试验。含能薄膜电爆炸性能测试系统示意图如图10所示,主要包括由电容储能放电装置、开关和含能薄膜样品组成的起爆回路,以及示波器、电流探头、电压探头、高速摄影仪等信号采集观测装置。

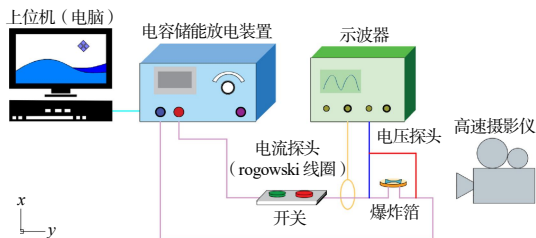


图10 测试系统示意图

Fig.10 Test system schematic

其中,电容储能放电装置由升压模块、0.1 μF 电容器和高压开关组成,能够提供400~1500 V电压,满足低能爆炸箔起爆系统要求。采用 MIT30mini

Rogowski 线圈测量起爆回路电流;采用 N2891A 高压探头测量含能薄膜两端的电压;采用 MSOX2024A 示波器记录电压和电流信号;采用 REDLAKEHG-100K 高速摄影仪观测爆炸火焰。高速摄影仪拍摄帧速为 100 000 frames·s⁻¹,视场为 592×448 像素,信号捕捉方式为光信号自动捕捉,即含能薄膜爆发出光亮时自动开始拍摄,此时含能薄膜电爆炸产生等离子体,拍摄至含能薄膜爆发火焰全部消散。

3 试验结果与讨论

3.1 试验结果处理方法

试验得到4种材料 Al 基含能薄膜在不同起爆电压下的电压电流曲线,采用 MATLAB 软件对曲线进行数据处理,计算出4种材料 Al 基含能薄膜在不同起爆电压下的沉积能量、能量利用率、桥区电流密度。计算公式如下:

$$E = \int_{t_0}^{t_r} U(t)I(t)dt \quad (7)$$

式(7)中: E 为含能薄膜沉积能量; t_0 为含能薄膜通电时刻; t_r 为含能薄膜桥区完全断裂时刻; $U(t)$ 为含能薄膜电爆过程电压曲线; $I(t)$ 为含能薄膜电爆过程电流曲线。

$$E_0 = \frac{1}{2}CU^2 \quad (8)$$

式(8)中: E_0 为电容储能放电装置输入能量; C 为电容储能放电装置电容; U 为电容储能放电装置输入电压。

$$\eta = \frac{E}{E_0} \quad (9)$$

式(9)中: η 为含能薄膜能量利用率。

$$\omega = \frac{I}{S} \quad (10)$$

式(10)中: ω 为桥区电流密度; I 为桥区电流; S 为含能薄膜桥区横截面面积。

3.2 电爆性能结果

采用 origin 软件对计算数据作图,得到4种材料 Al 基含能薄膜在不同起爆电压下的沉积能量、能量利用率、桥区电流密度,分别如图11~13所示。

由图11可知,随着起爆电压升高,4种材料 Al 基含能薄膜的沉积能量均呈增大趋势,且在某一起爆电压下发生跃升。其中,Al/Ni 含能薄膜的跃升电压

最小, 为 900 V, 沉积能量从 1.5 mJ 跃升为 11.1 mJ, 后续缓慢提升至 16.7 mJ (1 500 V)。Al/Ti、Al/Cu 含能薄膜的跃升电压均为 1 100 V, 沉积能量从 3 mJ 跃升至 18 mJ, 但后续 Al/Ti 含能薄膜的沉积能量增长更快, 1 500 V 时, Al/Ti 比 Al/Cu 含能薄膜的沉积能量多 5 mJ 左右; Al/CuO 含能薄膜的跃升电压最大, 为 1 300 V, 沉积能量从 3.6 mJ 跃升为 21.3 mJ。

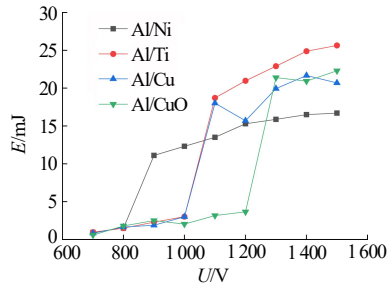


图 11 沉积能量对比图

Fig.11 Sedimentary energy comparison chart

由图 12 可知, Al/Ni、Al/Ti、Al/Cu、Al/CuO 含能薄膜的能量利用率分别在 900, 1 100, 1 100, 1 300 V 起爆电压下发生跃升, 与沉积能量的跃升电压相同。但后续随着起爆电压提升, 能量利用率逐渐减小, 即峰值能量利用率对应的起爆电压即为跃升电压, 常用这一电压作为相应含能薄膜的最佳起爆电压。4 种材料含能薄膜中, Al/Ti 的峰值能量利用率最高, 为 30.92%; Al/CuO 的峰值能量利用率最低, 为 25.31%。

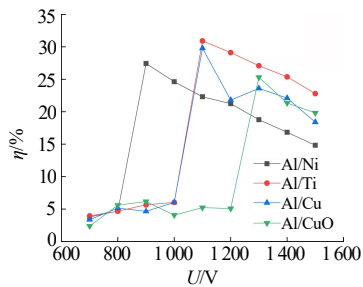


图 12 能量利用率对比图

Fig.12 Energy utilization ratio comparison chart

由图 13 可知, 随着起爆电压升高, 4 种材料 Al 基含能薄膜的桥区电流密度均呈增大趋势, 且在某一起爆电压下发生跃升, 其跃升电压与沉积能量的跃升电压相同, 但桥区电流密度的上升速率更快。其中, Al/Ni 含能薄膜的桥区电流密度在 900 V 时由 $1.98 \times 10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 跃升至 $5.19 \times 10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$; Al/Ti 含能薄膜的桥区电流密度在 1 100 V 时由 $2.79 \times 10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 跃升至 $7 \times 10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$; Al/Cu 含能薄膜的桥区电流密度在 1

100 V 时由 $2.96 \times 10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 跃升至 $6.66 \times 10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$; Al/CuO 含能薄膜的桥区电流密度在 1 300 V 时由 $3.13 \times 10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 跃升至 $7.67 \times 10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。发生跃升后, 4 种材料含能薄膜的桥区电流密度均呈缓慢提升趋势, 其峰值桥区电流密度由大到小依次为 $\omega_{\text{Al/Ti}} > \omega_{\text{Al/CuO}} > \omega_{\text{Al/Cu}} > \omega_{\text{Al/Ni}}$ 。

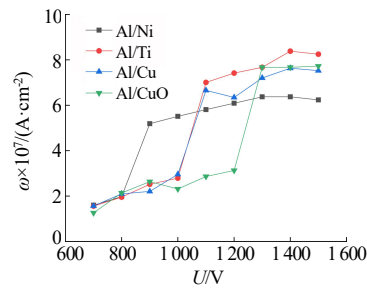


图 13 桥区电流密度对比图

Fig.13 Comparison diagram of current density in bridge area

3.3 高速摄影结果

通过高速摄影仪记录 4 种材料 Al 基含能薄膜电爆过程中的燃烧情况, 如图 14 所示。

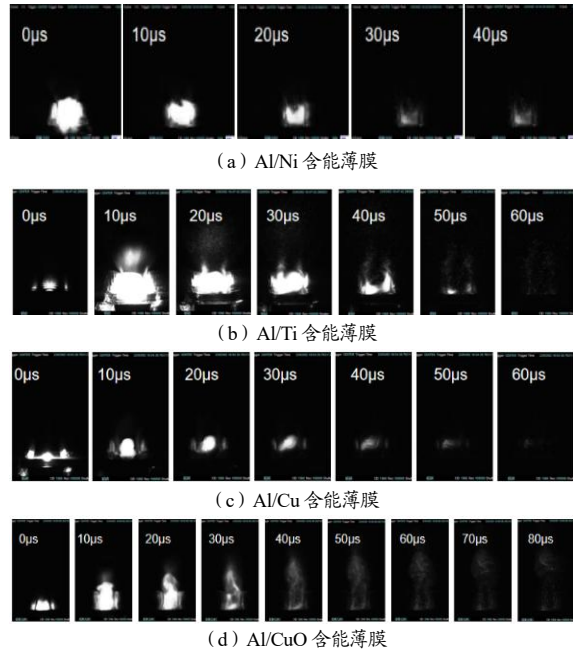


图 14 含能薄膜电爆发火过程高速摄影图

Fig.14 High speed photography of energetic thin film electrical explosion process

由图 14 (a) 可见, Al/Ni 含能薄膜电爆过程燃烧剧烈, 并伴随有高温产物粒子四处飞溅, 由此证明了含能薄膜电爆过程中 Al 和 Ni 2 种材料间发生了剧烈反应。根据测试过程中设定的感光区间和像素点可以推算出高温粒子的飞溅距离约为 3 mm, 但其持续时间较短, 仅有 40 μs 左右。

由图 14 (b) 可见, Al/Ti 含能薄膜在电爆反应初期燃烧剧烈; 20 μs 时, 燃烧反应扩散至玻璃基底, 喷发出的高温产物粒子与燃烧火焰之间出现间隔, 上方高温产物粒子向外飞散约为 5 mm, 燃烧部分尺寸大概为 2 mm。出现这种现象的原因是, Al 和 Ti 之间的结合力不足, 含能薄膜通电后, 下层金属薄膜剧烈反应, 顶层钛金属薄膜没有任何限制且与相邻铝层反应较弱, 从而被高温等离子体击发出去。根据此现象可合理推测, 当表层钛金属厚度增加到一定程度, Al/Ti 含能薄膜用于冲击片雷管时, 可取消外加飞片, 将表层钛金属层作为冲击装药的主要能量, 达到集成制备、简化组装、间隙点火的目标。

由图 14 (c) 可见, Al/Cu 含能薄膜的燃烧现象最为舒缓, 燃烧产生的火焰为“云团”状, 且高温产物粒子飞散距离基本与剧烈燃烧现象距离相同, 约为 2 mm。这是因为铝铜原子结合力强, 含能薄膜通电后, 在电热效应作用下, 金属间结合较快, 导致电爆炸现象中所产生的火焰为“云团”状。铝铜之间发生合金化反应产生的反应热较低, 铝铜材料体系相较于其他材料, 沉积能量、能量利用率较低, 同时最佳起爆电压较高, 单独作为冲击片发火元件的效果较差, 但铝铜原子之间扩散系数较大、结合力强, 铜可作为铝基反应体系含能薄膜的中间插层, 用来提升整个含能薄膜的附着性。

由图 14 (d) 可见, Al/CuO 含能薄膜燃烧现象最为剧烈, 燃烧部分已超过连线部分的接线夹, 且高温粒子扩散距离长, 持续时间长, 在 20 μs 时电爆强度达到最强, 火焰尺寸大约为 4 mm, 高温粒子扩散距离大约为 7 mm, 等离子体强度逐渐减弱, 直到等离子体羽辉完全脱离桥区持续时间超过 80 μs 。

4 结论

本文设计并制备了 4 种材料的 Al 基含能薄膜, 以其为对象, 开展电爆炸性能研究。结果表明:

(1) 仿真表明所设计的 4 种桥区形状中, 方形桥的性能最佳, 且最佳倒角半径为 0.17 mm。

(2) 在均能起爆前提下, 4 种 Al 基含能薄膜沉积能量随起爆电压升高而升高, 且在某一起爆电压下沉积能量均会发生突变, 同时能量利用率达到峰值。

(3) 4 种 Al 基含能薄膜中 Al/Ti 综合性能最佳, 其具有较大的沉积能量、能量利用率、桥区电流密度, 同时最佳起爆电压适中、火焰高度较高; Al/Ni 薄膜所需最佳起爆电压最小, 但作用能力较差; Al/CuO 薄膜反应最为激烈, 具有最佳的作用能力, 但所需最佳起爆电压较大; 相比于其他 3 种含能薄膜, Al/Cu 薄膜性能最不突出。

参考文献:

- [1] Lebedev E A, Rogachev A S, Vadchenko S G, et al. A “riding” combustion mode in CuO/Al reactive multilayer nano-foils[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121(13): 131 902.
- [2] Zhou X, Zhu Y, Ke X, et al. Exploring the solid-state interfacial reaction of Al/Fe₂O₃ nanothermites by thermal analysis[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(5): 4 115-4 123.
- [3] 太玉, 许建兵, 叶迎华, 等. 不同调制比的 Al/MoO₃ 含能半导体桥电爆特性研究[J]. *火工品*, 2018(1): 6-10.
- [4] Feng J R, Liu R, Gao F Y, et al. A molecular dynamics study on the chemical reaction of Ni/Al reactive intermetallics[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(18): 185 901.
- [5] Sen S, Lake M, Kroppen N, et al. Self-propagating exothermic reaction analysis in Ti/Al reactive films using experiments and computational fluid dynamics simulation[J]. *Applied Surface Science*, 2017(396): 1 490-1 498.
- [6] Zhang Y X, Wang Y, Ai M T, et al. Reactive B/Ti nano-multilayers with superior performance in plasma generation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(25): 21 582-21 589.
- [7] 杨程, 胡艳, 沈瑞琪, 等. 多层 Al/Ti 纳米含能桥膜的电爆性能研究[J]. *爆破器材*, 2015, 44(1): 33-36.
- [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.
- [9] 倪德彬, 于国强, 史胜楠, 等. Al/CuO 二维多层薄膜点火药的制备与性能研究[J]. *火工品*, 2018(1): 28-31.