

文章编号: 1003-1480 (2021) 06-0001-05

基于电热特性分析的微桥膜设计

闫守阳¹, 赵河明¹, 韩 晶¹, 鲁旭涛¹, 彭志凌¹, 付 博²

(1. 中北大学 机电工程学院, 山西 太原, 030051; 2. 淮海工业集团有限公司, 山西 长治, 046000)

摘 要: 为实现 MEMS 技术加工的微桥膜低能化, 设计不同结构和材料的桥膜, 仿真研究桥膜电流密度、温度的变化过程; 通过研究方形桥区对角线的电热特性曲线, 以解决电流与 H 型微桥膜材料的匹配问题。结果表明: 微桥膜两端输入电流为 500A 时, H 型桥膜桥区温度分布最均匀; 相比铜微桥膜, 金桥膜达到熔点所需的时间短, 但是平均升温速率低; 铜微桥膜的熔化面积大、分布更均匀。在 300~700A 输入电流范围内, 对于铜、金、铝 H 型微桥膜, 输入电流依次为 500A、450A、400A 时起爆可以提高它们的能量利用率。

关键词: 微桥膜; 小型化; 低能化; 电流密度; 温度; 能量利用率

中图分类号: TJ450.2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.06.001

Design of Micro-bridge Membrane Based on Electrothermal Analysis

YAN Shou-yang¹, ZHAO He-ming¹, HAN Jing¹, LU Xu-tao¹, PENG Zhi-ling¹, FU Bo²(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051;
2. Huaihai Industry Group Co. Ltd., Changzhi, 046000)

Abstract: To realize the miniaturized micro-bridge films processed by MEMS technology with low energy initiation, the miniaturized micro-bridge films with different structures and materials were designed, the current density and temperature change process were studied by simulation. By studying the electrothermal characteristic curve of the diagonal of square bridge area, the matching problem of current and material of H-shaped micro-bridge membrane was solved. The results show that the temperature distribution of H-shaped bridge is the most uniform when the input current at both ends of the micro-bridge is 500A. Compared to copper bridge film, it takes less time to reach the melting point for gold bridge film, while its average heating rate is lower. The melting area of copper micro-bridge film is larger and the distribution is more uniform. In the input current range from 300A to 700A, the initiation of copper, gold and aluminum micro-bridge films with the current of 500A, 450A and 400A can improve their energy utilization rate.

Key words: Micro-bridge membrane; Miniaturization; Dumbing down; Current density; Temperature; Energy efficiency

目前, 在确保可靠性和安全性的前提下, 低功耗和小型化是冲击片雷管激发起爆高能钝感炸药面临的主要应用瓶颈, 将 MEMS 工艺引入爆炸箱可以降低输入激发能量, 是解决此瓶颈的有效方式之一, 研究运用 MEMS 工艺方法加工的微桥膜对电爆炸激发

效应的影响有重要意义^[1-2]。Logan 等^[3]建立了一种电导率模型, 计算了铝、铜和金的伏安特性曲线。冯长根等^[4]用 FIRE-SET 模型计算了金、铜、铝和金铂合金等 4 种桥箔电爆炸时的性能。董玉斌等^[5]用有限元差分法分析常规尺寸铜箔的电热过程, 采用一些经验

收稿日期: 2021-08-02

作者简介: 闫守阳 (1995-), 男, 硕士, 主要从事火工品换能激发效应研究。

通讯作者: 韩晶 (1980-), 男, 教授, 主要从事火工品换能激发效应研究。

基金项目: 毁伤技术重点学科研究基金 (DXMBJJ2020-01)。

或者半经验的比作用量模型预估动态电阻,或用有限元方法对金属箔加热进行分析,但是没有从电流密度变化结合熔融速率分析小型化、低能化铜、金、铝微桥膜电热过程,以及输入电流与微桥膜材料的匹配问题。本文对镀膜、光刻制备的小型化微桥膜进行电热过程仿真分析,根据熔融速率和电流密度变化分析不同结构和材料的电热特性,并结合电爆炸实验验证微桥膜的电热性能。

1 基底选择与桥膜的制备

基底的选择有 Pyrex7740 玻璃片、硅材质和窗玻璃。相比硅材质和窗玻璃,选择具有较低的热导率、较高的电阻、与 MEMS 工艺更为兼容的 Pyrex7740 玻璃作为基底。由于桥膜的形状、表面质量和厚度对能量转化效率均有一定的影响,综合考虑后拟用磁控溅射技术来进行桥膜的制备。桥膜的具体制备工艺流程如图 1 所示,制备的铜微桥膜如图 2 所示。

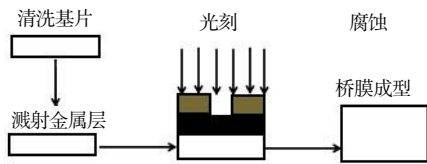


图 1 工艺流程图
Fig.1 Process flow chart

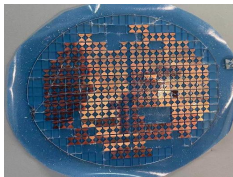


图 2 铜微桥膜图
Fig.2 Copper micro-bridge membrane diagram

2 电热过程的有限元建模

2.1 电热方程

本文采用 COMSOL 有限元分析软件对微桥膜电爆熔化前进行电热模拟^[6]。其电热模拟的本质是求解瞬态传热方程,用式(1)表示:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p U \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-K \nabla T) = Q \quad (1)$$

式(1)中: ρ 为桥箔密度, $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$; C_p 为恒压热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; T 为温度, K ; t 为时间, s ; K

为导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; U 为速度场, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; Q 为热源, W 。电流在导体中连续传输方程用式(2)表示,电位移方程用式(3)表示:

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot E + \frac{\partial D}{\partial t} + J) = Q \quad (2)$$

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (3)$$

式(2)~(3)中: σ 为电导率, $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$; E 为电场强度, $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$; ε 为相对介电常数, 1; D 为电位移, $\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$; J 为电流密度, $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$; 铜、金、铝电阻率与温度的关系分别用式(4)~(6)^[7]表示。微桥膜参数如表 1 所示。

$$\delta_{\text{Cu}} = [1.72 \times 10^{-8} \times (1 + 0.0039 \times (T - 298))]^{-1} \quad (4)$$

$$\delta_{\text{Au}} = [2.4 \times 10^{-8} \times (1 + 0.0032 \times (T - 298))]^{-1} \quad (5)$$

$$\delta_{\text{Al}} = [2.85 \times 10^{-8} \times (1 + 0.0042 \times (T - 298))]^{-1} \quad (6)$$

表 1 微桥膜参数

材料属性	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3})$	参考电阻率 $r / (\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	温度系数 α	恒压热容 $C_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	导热系数 $K / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
铜	8 960	1.72×10^{-8}	0.003 9	385	400
金	19 300	2.40×10^{-8}	0.003 2	129	317
铝	2 700	2.85×10^{-8}	0.004 2	900	315

2.2 几何结构与参数设置

桥膜以边长为 $250 \mu\text{m}$ 的 H 型桥区为基础桥形进行结构变换, 衍生图形 E、F、G 型结构。其中, 桥区两侧保持 $250 \mu\text{m}$, 将桥区中心两侧距离缩小至 $200 \mu\text{m}$, 做圆弧半径为 $125 \mu\text{m}$ 的弧, 命名为 E 型结构; 桥区两侧保持 $250 \mu\text{m}$, 将桥区中心两侧距离扩大至 $300 \mu\text{m}$, 做圆弧半径为 $125 \mu\text{m}$ 的弧, 命名为 F 型结构; 桥区两侧保持 $250 \mu\text{m}$, 做六边形结构, 命名为 G 型结构。铜微桥膜桥区结构如图 3 所示。G 型铜微桥膜长为 5mm , 宽为 3mm , 桥宽为 0.25mm , 桥长为 0.25mm , 膜厚为 0.003mm 。

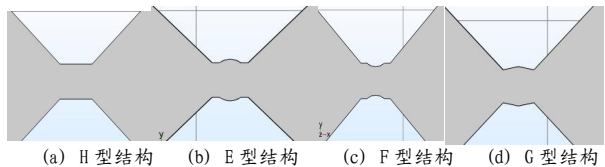


图 3 铜微桥膜桥区结构图
Fig.3 Structure diagram of copper micro-bridge membrane bridge area

在微桥膜三维模型搭建时, 需要设定边界条件和终端电流。由于金属膜桥导热迅速, 因此把微桥膜两端设置为恒温边界条件, 其他边界均为热辐射和热对流边界条件^[8]。考虑实际热对流, 取对流换热系数为 $6\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ^[9]。选择瞬态求解器求解, 时间步长为

0.1μs, 时间段为 0~4μs。网格划分如图 4 所示。

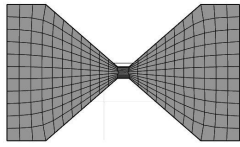


图 4 网格划分图
Fig. 4 Mesh division diagram

2.3 有限元仿真模型验证

对桥膜一端施加接地约束, 对另一端施加 1A 稳态电流, 由欧姆定律可知微桥膜两端的电压值数值上等于微桥膜的电阻值, 从而得到方形爆炸桥箔电阻值^[10]。求解得到的方形微桥膜电压分布如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 仿真得到的铜、金、铝微桥膜两端电阻值依次为 30mΩ、50mΩ、30mΩ。采用 UNI-T/UT 602-B 毫欧表测量桥区电阻, 得到铜、金、铝微桥膜两端电阻依次为 26mΩ、56mΩ、27mΩ。误差分别为 13.3%、10.7%、10.0%, 由此说明建立的仿真模型基本正确, 材料参数基本合理。

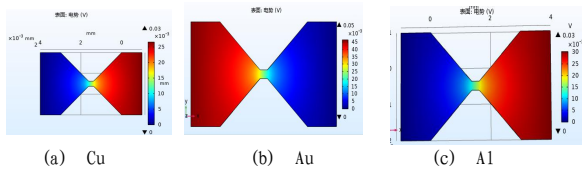


图 5 电阻值仿真
Fig.5 Resistance value simulation

3 微桥膜电热特性分析

3.1 不同结构的铜微桥膜温度分布

对 4 种结构的铜微桥膜两端施加 500A 的电流, 研究达到熔点温度所对应的温度分布图, 如图 6 所示。

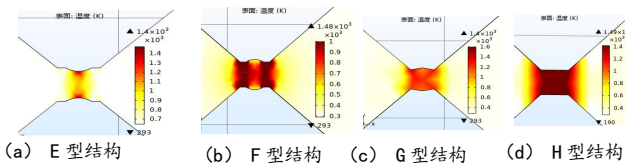


图 6 4 种结构铜微桥膜温度分布图
Fig 6 Temperature distribution of four types of copper micro-bridge films

由图 6 可以得到, E 型结构升温从圆弧中心开始, 向内再向外扩展到整个桥区。桥区圆弧的温度高于桥区圆弧两侧温度, 桥区外侧基本无温度分布。F 型结构温度升温从 4 个拐角开始, 桥区两侧升温速率明显高于桥区中心, 因此桥区两侧温度高于桥区中心温度。G 型、H 型结构升温从 4 个拐角开始, 然后向四

周扩展到整个桥区, 它们的桥区温度高于桥区外侧温度, 但是 H 型桥区比 G 型桥区温度更均匀且桥区都能够达到熔化的温度。

3.2 不同材料 H 型微桥区电流密度变化过程分析

电源电压为 800V、充电电容为 0.1μF 时, 电爆炸时微桥膜两端的电流约为 500A, 因此在该模型中的电极两端施加 500A 的输入电流。为了描述电流密度的变化过程及区域, 根据测试的电流电压峰值时间小于 500ns, 仿真得到的电流密度达到爆炸时的时间小于 4μs 和最大电流密度的量级, 对铜、金、铝桥膜电爆炸过程进行分析, 如图 7 所示。

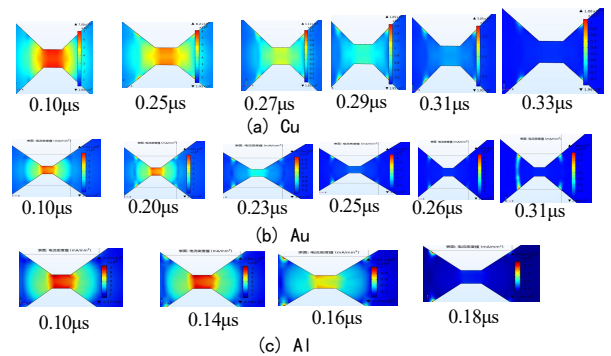


图 7 铜、金、铝微桥膜的电流密度变化图

Fig.7 Current density change diagram of copper, gold and aluminum micro-bridge films

纯铜、金、铝爆炸电流密度临界值分别为 $9.09 \times 10^9 \text{ mA} \cdot \text{mm}^2$ 、 $8.79 \times 10^9 \text{ mA} \cdot \text{mm}^2$ 、 $8.53 \times 10^9 \text{ mA} \cdot \text{mm}^2$ ^[11]。由图 7 可以看到, 电流密度都是由 4 个拐角处开始扩展到整个桥区, 拐角处的电流密度最先达到起爆值, 但是铜微桥膜的爆炸过程长, 起爆时的电流密度大。在 0.10μs 到电流密度刚达到 $10^9 \text{ mA} \cdot \text{mm}^2$ 量级的第 1 时间段, 铜、金、铝微桥膜的平均电流密度速率分别为 $2.365 \times 10^9 \text{ mA} \cdot \text{mm}^2 \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 、 $8.285 \times 10^9 \text{ mA} \cdot \text{mm}^2 \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 、 $4.217 \times 10^9 \text{ mA} \cdot \text{mm}^2 \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。在电流密度为 $10^9 \text{ mA} \cdot \text{mm}^2$ 量级到电流密度发生突变的第 2 时间段, 铜、金、铝微桥膜的平均电流密度速率分别为 $4.85 \times 10^{10} \text{ mA} \cdot \text{mm}^2 \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 、 $1.35 \times 10^{11} \text{ mA} \cdot \text{mm}^2 \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 、 $1.50 \times 10^{11} \text{ mA} \cdot \text{mm}^2 \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。升温主要与电导率、恒压热容、电场强度有关^[12]。第 2 时间段铝微桥膜的平均电流密度速率大于铜、金桥膜, 由于内部的加热使得其电阻率降低, 并且比铜、金微桥膜快, 导致电导率迅速上升, 从而使得电流密度突变。电流密度变化快既每单位横截面积电流量变化快, 电流量变化快使电流通过导体产生的热量大, 电

热又会导致金属导体表面熔化。由于趋肤效应，传导区域更加局限于金属桥膜表面，导致表面电流密度增高，同时材料与材料之间会发生电迁移，金属微桥膜表面会产生形变，因此电流密度变化快慢会导致桥膜变形和熔化速率不同，进而影响电加热阶段微桥膜表面能量释放的大小。铜微桥膜第2时间段与第1时间段平均电流密度速率的差值小于金和铝，因此铜微桥膜的电流密度变化比金和铝的平稳。

3.3 不同材料H型微桥区温度变化过程分析

对铜、金、铝微桥膜在500A电流作用下的电热过程进行了模拟，温度变化如图8所示。

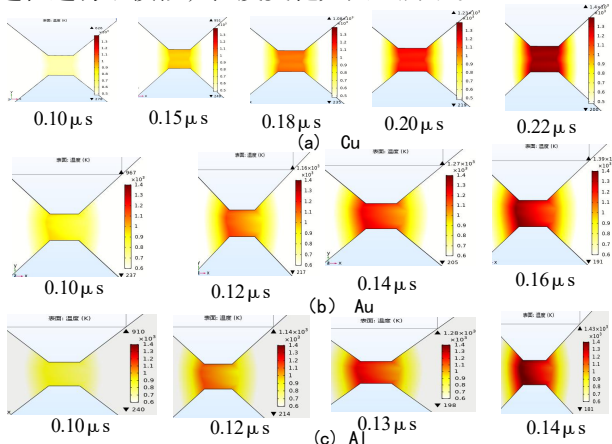


图8 铜、金、铝微桥膜的温度变化图

Fig.8 Temperature change diagram of copper, gold and aluminum micro-bridge films

从图8可以看出，铜、金、铝微桥膜升温都从拐角处扩展到桥区，在0.10~0.14 μs 时间段内，铜、金、铝微桥膜的平均升温速率依次为10 833K $\cdot\mu\text{s}^{-1}$ 、10 100K $\cdot\mu\text{s}^{-1}$ 、16 333K $\cdot\mu\text{s}^{-1}$ 。在0.14~0.22 μs ，铜微桥膜的平均升温速率为5 612.5K $\cdot\mu\text{s}^{-1}$ ；在0.14~0.16 μs ，金微桥膜的平均升温速率3 000K $\cdot\mu\text{s}^{-1}$ 。在温度为 1.4×10^3 K下，颜色图例对应的颜色为深红色，此深红色对应的铜、金、铝、桥膜的桥区面积依次约为0.062 5mm²、0.055 0mm²、0.031 0mm²。可以看出开始铜、金微桥膜升温接近，随后铜桥膜升温快于金桥膜，此时铝桥膜为熔融状态，整个过程铝桥膜的升温高于铜、金。金桥膜比铜桥膜在0.10 μs 时的温度高，所以达到熔点所需的时间短，但是铜微桥膜的平均升温速率高于金桥膜。铜微桥膜的熔化面积大、分布均匀。

3.4 输入电流对桥膜电热关系的影响

取桥区对角线进行研究，如图9所示，探讨电流

对桥区升温速率的影响和升至熔点时所需时间与电流的关系，铜、金、铝电热特性曲线如图10所示。

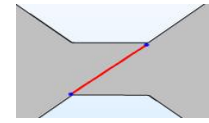


图9 桥区对角线研究图

Fig.9 Diagonal research diagram of bridge area

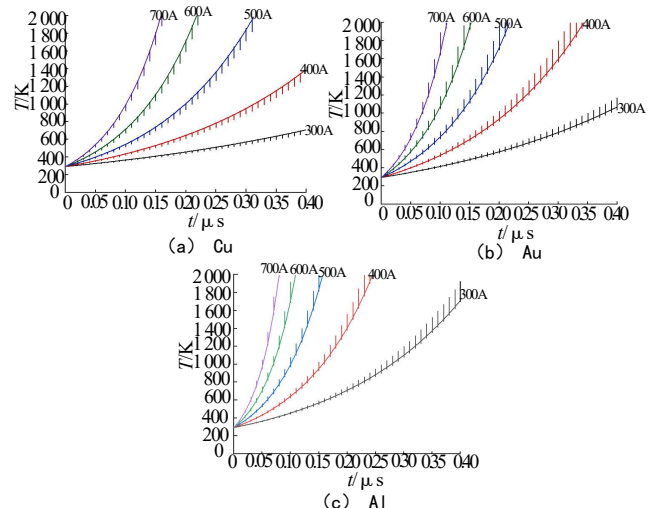


图10 铜、金、铝电热特性曲线

Fig.10 Electrothermal characteristic curves of Cu, Au and Al micro-bridge films

微桥膜的熔化时间占爆发时间的比例基本是固定的，经验表明桥区熔化时间约为爆发时间的90%。研究表明桥区在电流达到峰值时发生电爆炸，此时能量利用率最高^[13]。因此可以将微桥膜的爆炸时间转化成熔化时间，再找出熔化时间对应的输入电流，从而实现输入电流与桥膜材料的匹配。铜、金、铝的熔点分别为1 358K、1 337K、934K。由电流密度仿真得到铜、金、铝微桥膜的爆发时间依次为0.33 μs 、0.31 μs 、0.18 μs ，推出熔化时间分别为0.288 μs 、0.234 μs 、0.162 μs 。从图10可以看出，铜、金、铝微桥膜的熔化时间接近0.288 μs 、0.234 μs 、0.162 μs 时对应的电流依次约为500A、450A、400A。因此在输入电流为300~700A内，选择铜、金、铝微桥膜，当输入电流依次为500A、450A、400A时起爆，可以提高它们的能量利用率。

4 电热实验验证

将微桥膜焊接在实验箱(图11)背部0.2 μF 的放

电单元接线柱上,调节充电电压使桥膜输入电流为500A。



图 11 实验箱

Fig. 11 Experimental chamber

对每个材料的桥膜分别取2个试样进行测试,铜、金、铝微桥膜的电爆实物图如图12所示。

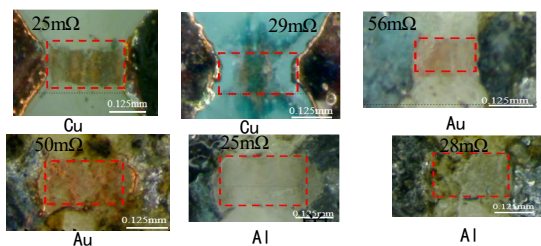


图 12 铜、金、铝微桥膜桥区电爆实物图

Fig. 12 Physical diagram of electric explosion in foil bridge area of copper, gold and aluminum

电爆炸固体加热第1阶段是研究电爆炸温度变化的基础。电流密度的变化影响温度变化,温度的变化会影响爆炸区域面积的大小^[14]。由图12可以看到铜微桥膜爆炸后的桥区长度更长,拐角处无材料或者拐角处的材料向外延伸,整个桥区材料比较均匀,利于推动飞片。铜、金微桥膜爆炸时的温度大于铝微桥膜的温度,从而反映加热阶段的温度区域大于铝的温度区域,进一步说明铜、金微桥膜爆炸时的电流密度较大且均匀,与电热仿真结果吻合。

5 结论

本文采用COMSOL有限元软件对不同结构不同材料的小型化微桥膜进行电热分析,得到如下结论:(1)选择Pyrex7740玻璃基底沉积的H型桥区的微桥膜更利于实现桥膜低能化。(2)铜微桥膜起爆时的电流密度大,电流密度增长平稳。(3)金桥膜比铜桥膜在0.10μs时的温度高,所以达到熔点温度所需的时间短,但是铜微桥膜的平均升温速率高于金桥膜,且铜微桥膜熔化面积大、分布均匀。(4)在300~700A电流范围,选择铜、金、铝H型微桥膜,输入电流依

次为500A、450A、400A起爆可以提高其能量利用率。

参考文献:

- [1] Lei F, Ye Q, Yang S, et al. Study on electrical explosion properties of Cu/Ni multilayer exploding foil prepared by magnetron sputtering and electroplating[J]. *Micromachines*, 2020, 11(5): 528.
- [2] Qingchou Chen. Parametric influences on the flyer velocity driven by electrical explosion[J]. *Institute of Chemical Materials*, 2019(6): 76-79.
- [3] 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, 2016.
- [4] 冯长根. 桥箔电爆炸过程数值计算分析[J]. *含能材料*, 2004, 12(增刊): 484-487.
- [5] 董玉斌, 李献文, 董维申. 电加热金属箔爆炸的有限元法计算[J]. *爆炸与冲击*, 1981(01): 28-36.
- [6] 郭宁, 周文渊, 李建, 等. 基于MEMS工艺的集成爆炸箔起爆器研究[J]. *上海航天*, 2019, 36(S1): 120-126.
- [7] 赵彦, 曾庆轩, 梁琦. 电爆炸桥箔电导率模型研究[J]. *兵工学报*, 2008(08): 902-906.
- [8] 鲍丙亮. 微尺寸起爆系统关键技术及应用研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [9] Spalding, D.B. *Handbook of heat transfer fundamentals and handbook of heat transfer applications*[M]. New York: McGraw-Hill, 1985.
- [10] 苏谦, 褚恩义, 解瑞珍, 等. 九点爆炸箔电爆炸性能试验与仿真模拟[J]. *火工品*, 2019(5): 15-18.
- [11] 王寅. 材料金属飞片对EFI起爆能量的影响[J]. *装备环境工程*, 2019(12): 67-72.
- [12] Baginski M E, Shaffer E C, Thomas K A, et al. A comparison of the electrodynamics of metals under the action of large electric currents[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2000, 11(2): 77-91.
- [13] 王亮, 邹苑楠, 蒋小华, 等. 短脉冲电流作用下铜微桥箔的电热分析[J]. *含能材料*, 2013, 21(04): 500-505.
- [14] 陈清畴, 伍俊英, 只永发, 等. 金属桥箔爆发规律的数值计算[J]. *北京理工大学学报*, 2014, 34(06): 556-560.