

文章编号:1006-9941(2024)01-0083-09

基于激光加工的微安保机构设计与性能

章云¹,姜倩¹,刘卫²,解瑞珍²,任小明²,刘兰²

(1. 西安电子科技大学 机电工程学院,陕西 西安 710071;2. 陕西应用物理化学研究所 应用物理化学重点实验室,陕西 西安 710061)

摘要: 复杂场景下火工品微安保机构需具有可恢复与抗过载特性,为此,研究设计了基于激光加工的金属材质电热驱动微安保机构,采用有限元模拟分析了镍基电热执行器动作特性,通过调整双热臂U型电热执行器热臂和冷臂的长度、宽度以及各臂之间的间隙,探究它们对输出位移的影响;通过正交实验得到优化的超快激光加工工艺参数分别为频率100 kHz、能量113 μJ 、切割速度 $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,实现了镍基电热微安保机构的超快脉冲激光精确制造;最后,搭建了安保机构性能验证平台,验证了该机构在不同电流激励下的驱动位移与隔爆性能。结果表明,在8 A激励电流下,加工的镍基微安保机构驱动位移可达 $1084\text{ }\mu\text{m}$,所组装的火工品微安保机构在传爆序列中能够有效隔爆。

关键词: 电热驱动;微机电系统(MEMS);微安保机构;激光加工

中图分类号: TJ5;T145;T15

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023032

0 引言

火工品系统是武器系统始发能源的关键器件和装置,在武器弹药、航空航天中发挥引爆、传爆等作用,占据重要地位^[1-2]。随着现代工业的发展,火工品系统呈现小型化和智能化特征,其配套的安保机构也需要更精细、可靠、智能。因此,为保障火工品系统安全可靠运行,亟需制作一种性能优良的微安保机构。

学者们围绕微安保机构开展了诸多研究,机械解保作为最早的解保方式,应用较成熟。Robinson等^[3]研究了一种由滑块、转子、锁闩、弹簧和锁组成,可利用惯性力完成解保的机械安全保险装置。Seok等^[4]研制了基于球驱动的新型MEMS安保装置,可抗高冲击,结构也简单。为提升解保过程的可控性,可采用电磁驱动、电化学驱动和电热驱动等方法实现安保结构

的主动驱动^[5-7]。电磁式驱动法具有较大的输出力和位移,响应速度快,但功率消耗大、线圈式结构复杂、制备成本高;电化学驱动法中,以火药燃烧产生的气体作为驱动源,能量密度高,驱动位移大,但含能材料配比和制备不易控制,与器件制造工艺兼容性差、制造过程较繁琐;相比而言,电热驱动法结构紧凑、驱动电压小以及输出力和位移性能较好。

传统单向解保方式有一定的局限性,例如:当发现攻击目标错误或异常时,不可按预定程序起爆,但此时已解除保险的火工品具有极大安全风险,需要安保机构具有安全状态可恢复特性,以对爆炸序列进行再次隔断^[8]。为此,学者们对可恢复安保机构进行了初步尝试,南京理工大学朱珊^[8-9]提出了一种基于滑块继续运动的可恢复安全隔离装置,用于尺寸空间较小的小口径炮弹中。在微型化可恢复式安保机构方面,目前多数微安保机构都是采用硅基材料制作驱动执行器,但硅基材料耐摩擦性、抗周期疲劳以及抗过载能力较差,其应用于可恢复式机构时疲劳强度不可控。相比而言,金属材料的抗疲劳、抗过载性强,但其精密制造工艺手段却不足。随着激光技术的飞速发展,激光加工已用于在复杂、精细金属零件的批量制造,可同时满足加工精度与生产效率需要。Lai等^[10]将多个驱动单元串联起来,形成级联结构,利用激光微加工技术制造

收稿日期:2023-03-01;修回日期:2023-07-18

网络出版日期:2023-10-24

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-333),陕西省创新能力支撑计划(2023-CX-PT-30)

通信联系人:章云(1983-),男,副教授/博士生导师,主要从事智能传感与微执行器、新能源发电与换能技术研究。e-mail:yun-zhang@xidian.edu.cn

刘卫(1986-),男,高级工程师/博士,主要从事MEMS火工品技术研究。e-mail:peony1303@126.com

引用本文:章云,姜倩,刘卫,等.基于激光加工的微安保机构设计与性能[J].含能材料,2024,32(1):83-91.

ZHANG Yun, JIANG Qian, LIU Wei, et al. Design and Performance of Micro Safety and Arming Device Based on Laser Processing[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(1):83-91.

了几种具有不同数量驱动单元的微驱动器。Wang等^[11]研究了飞秒激光直接制备镍微悬臂梁,并对激光加工参数进行了优化,得到了结构、尺寸构型良好的镍微悬臂梁,但该结构驱动位移较小。

综上,现有研究或因驱动方式局限而无法满足现代智能火工品可恢复特性,或因安保系统关键构件材料属性而对于恶劣环境适应性不够,亟待研究具备良好控制特性、结构强度满足疲劳与过载需求的新型微安保机构。鉴于此,本研究设计分析了一种利用电热原理驱动的金属基微安保机构,引入了激光制造工艺对安保机构进行了精细加工,并通过仿真与实验得到了合理的结构尺寸和加工工艺参数,最后,结合实验验证了所开发的微安保机构作动与隔爆性能。

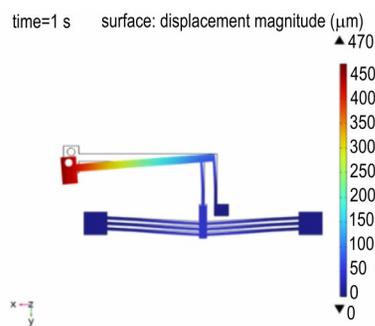
1 微安保机构驱动结构与整体方案设计

1.1 微安保机构驱动结构设计

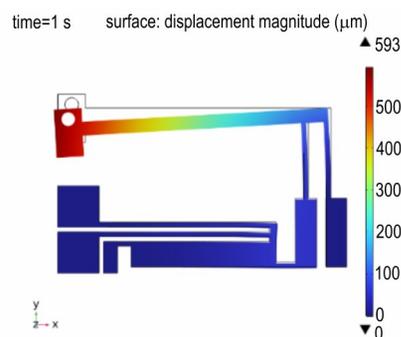
考虑到微安保机构设计中电热驱动器的结构紧凑、驱动电压小、输出力和输出位移较大等优点,本研究采用热膨胀变形原理作为驱动源。微型电热执行器主要有U型和V型2种结构形式,其中U型电热执行器有单热臂结构和双热臂结构,在热臂长度和电压相同的条件下,由于双热臂U型电热执行器产生的位移比单热臂U型电热执行器产生的位移大^[12],为此,研究选择双热臂U型电热执行器进行研究。

研究选取总体尺寸为 $21.15\text{ mm}\times 13.00\text{ mm}$ 的U型双热臂电热执行器和总体尺寸为 $33.83\text{ mm}\times 11.49\text{ mm}$ 的V型电热执行器,通过COMSOL多物理场仿真,对V型电热执行器和U型双热臂电热执行器的驱动位移进行了分析,加载 10 A 电流,测试得到2种执行器的位移输出对比图,结果如图1所示,其中2种执行器的热臂长度、臂宽、各臂之间间隙相同,放大机构尺寸相同。由图1可以看到,U型双热臂电热执行器输出位移为 $593\text{ }\mu\text{m}$,V型电热执行器输出位移为 $470\text{ }\mu\text{m}$,装置最高温度为 578 K ;可见,结构尺寸相同,同样的电流激励下,总尺寸较小的U型双热臂电热执行器能够输出更大的位移。

为实现更大的输出位移,研究选取U型双热臂电热执行器与柔顺放大机构的集成形式进行安保机构设计分析,其中,U型双热臂电热微致动器模型如图2所示,图2中外热臂连接正电极,内热臂连接负电极,虚线部分表示通电后运动方向,最终输出位移量用字母D表示。



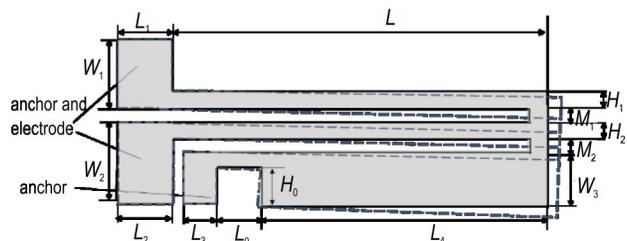
a. output displacement of V-type electrothermal actuator



b. output displacement of U-type electrothermal actuator

图1 U型和V型电热执行器与放大机构集成对比

Fig.1 Comparison of U-type and V-type electrothermal actuators integrated with amplification mechanism



L_1 —内外热臂长度, L_4 —冷臂长度, L_0 —弯曲段长度, M_1 —内外热臂间隙, M_2 —内热臂与冷臂间隙, L_1 —外热臂电极长度, L_2 —内热臂电极长度, L_3 —冷臂电极长度, W_1 —外热臂电极宽度, W_2 —内热臂电极宽度, W_3 —冷臂电极宽度, H_1 —外热臂宽度, H_2 —内热臂宽度, H_0 —弯曲段宽度

L —the length of the inner and outer hot arms, L_4 —the length of the cold arm, L_0 —the length of the bending section, M_1 —the gap between the inner and outer hot arms, M_2 —the gap between the inner hot arm and the cold arm, L_1 —the length of the outer hot arm electrode, L_2 —the length of the inner hot arm electrode, L_3 —the length of the cold arm electrode, W_1 —the width of the outer hot arm electrode, W_2 —the width of the inner hot arm electrode, W_3 —the width of the cold arm electrode, H_1 —the width of the outer hot arm, H_2 —the width of the inner hot arm, H_0 —the width of the bending section

图2 双热臂U型电热微致动器模型

Fig.2 Model of a U-shaped electrothermal micro actuator with two thermal arms

为了探究梁之间的间隙对结构位移的影响^[13],研究分3种情况进行分析,包括:(1)仅改变内外热臂间隙 M_1 ,保持内热臂与冷臂之间的间隙 M_2 不变;(2)仅改变内热臂与冷臂之间的间隙 M_2 ,保持内外热臂间隙 M_1 不变;(3)同时改变内外热臂间隙 M_1 和内热臂与冷臂之间的间隙 M_2 。研究结果如图3所示。由图3可以看出,无论是改变内外热臂间隙还是内热臂与冷臂之间的间隙,电热执行器的输出位移都会随着间隙的增大而减小,并且内外热臂之间间隙比内热臂与冷臂之间的间隙对结构位移影响稍大。若同时改变内外热臂间隙和内热臂与冷臂之间的间隙,且两个间隙相等,则间隙越小结构产生的位移越大,并且比只减小一个间隙位移更大。为此,在加工条件允许的情况下,应尽可能减小各臂间隙。

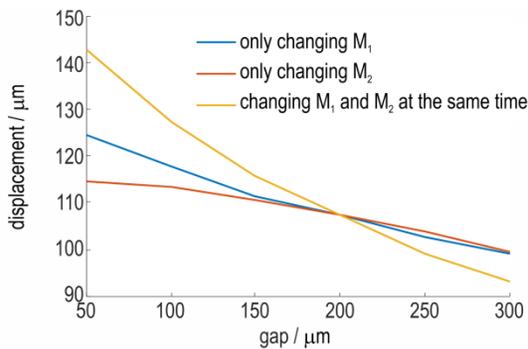


图3 梁之间的间隙对位移大小的影响
Fig.3 The effect of the gap between the beams on the magnitude of the displacement

此外,弯曲段尺寸对结构位移的影响也需要计入。为此研究分别改变弯曲段宽度与长度,通过COMSOL多物理场仿真软件进行研究,结果如图4所示。由图4可以看出,弯曲段的长度和宽度对输出位移的影响是相互制约的,宽度越小、长度越长,结构的输出位移越大。

结合图3和图4分析结果,在满足技术指标的前提下,应使结构尽量紧凑。最终设计了基于如图2所示U型电热执行器与柔性一级放大机构集成的安全与解保机构,总体尺寸为21.15 mm×13 mm。其中,双热臂U型电热执行器 $L=12.5$ mm, $L_4=9.65$ mm, $L_0=1.5$ mm, $M_1=0.35$ mm, $M_2=0.35$ mm, $L_1=3$ mm, $L_2=3$ mm, $L_3=1$ mm, $W_1=3$ mm, $W_2=3$ mm, $W_3=2.3$ mm, $H_1=0.35$ mm, $H_2=0.35$ mm, $H_0=0.35$ mm。柔性放大机构弯曲梁和支撑梁宽度均为0.35 mm,长度均为5.55 mm。

为研究电热执行器封装后的驱动特性,将底板与

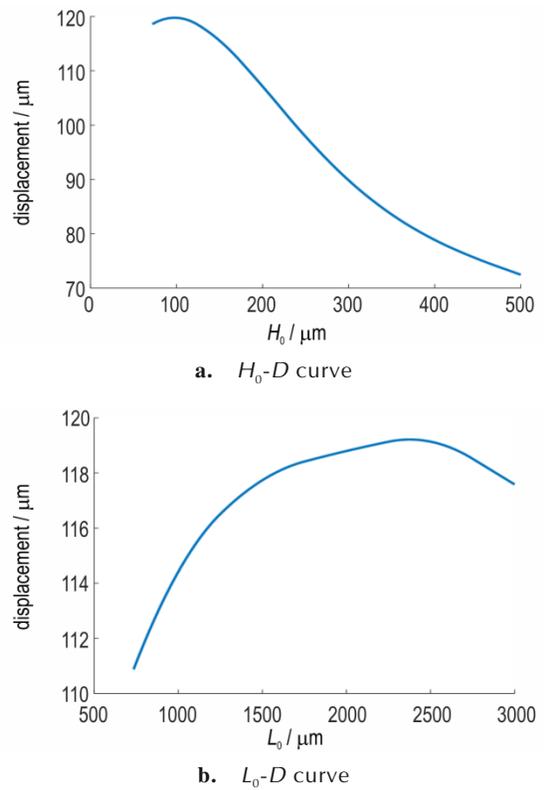


图4 弯曲段宽度和长度对位移大小的影响
Fig.4 Influence of the width and the length of the bending section on the magnitude of the displacement

盖板进行集成建模,进而构建了其电热耦合分析模型。仿真时,对电热执行器在1 s内施加8 A电流,1 s后停止通电,考虑基底处由于热传导导致的温升,仿真分析结果由图5a可知,解保过程中,在1 s内,只有电热执行器热臂温度明显升高到493 K,基底温度无明显变化,由图5b可知,在施加8 A的激励下,安保机构在断电2 s后恢复至安全位置。

在图5a的模型基础上,1s内对电热执行器添加不同电流激励,仿真模拟得到安保机构的位移-时间和温度-时间曲线,如图6所示。由图6可以看出,10 A电流时,最大位移可在1 s时达到1547 μm,并且最高温度为708 K。由于金属镍的熔点为1726 K,这表明该安保机构可以在未达到熔点的前提下,实现大行程的驱动。同时,由图6可知金属镍制造的电热驱动器输出位移随着电流升高而增大,因实际安保机构的电阻偏小,故镍基电热执行器可以在较低的激励电流下产生比较大的输出位移,可满足现代电火工品系统低压发火需要。

1.2 微安保机构整体方案设计

基于上述分析,研究设计了如图7示意图所示火

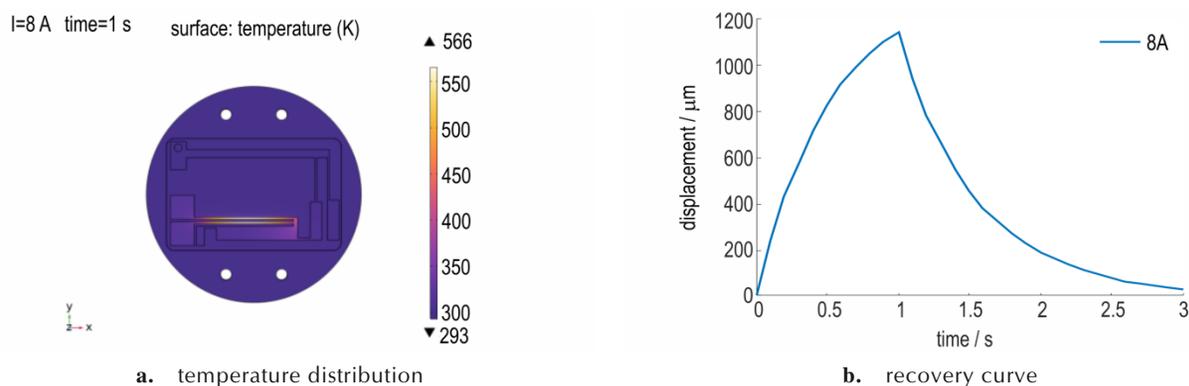


图5 安保机构温度分布和位移恢复曲线

Fig.5 Temperature distribution and displacement recovery curve of the safety and arming device

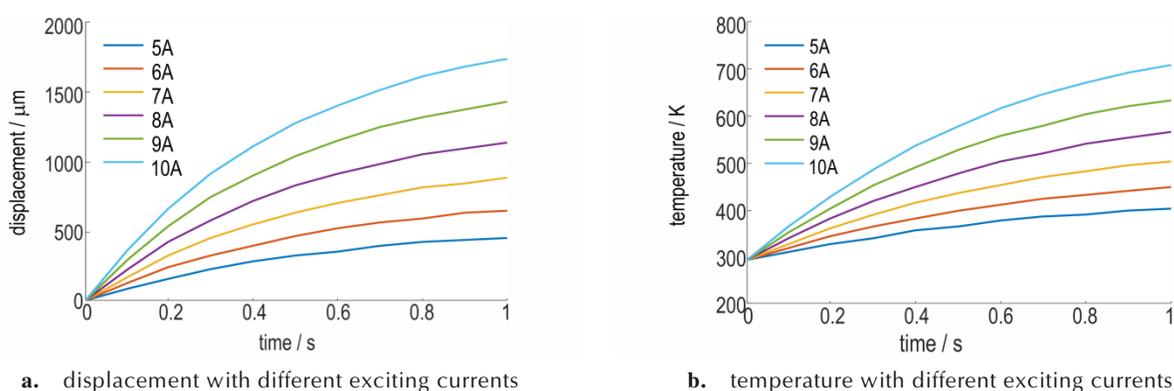


图6 不同电流下电热执行器最大位移和最高温度分布图

Fig.6 The maximum displacement and maximum temperature distribution of electrothermal actuator at different current

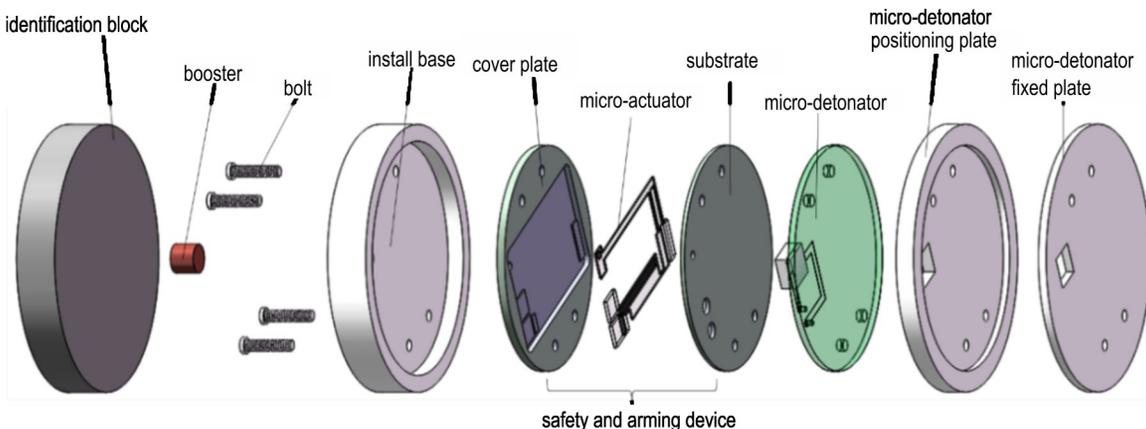


图7 火工品系统整体结构示意图

Fig.7 The overall structure of initiating explosive device system

工品系统,图7从右向左依次为起爆器固定板、起爆器定位板、起爆器、安保装置、安装基底、螺栓、传爆药和鉴定块。安装基底上有传爆药尺寸一致的装药孔。

其中,安保机构部分如图8所示,安全状态时,安保机构上的解保孔与盖板和底板上的传爆孔处于错位状态,当电热执行器收到解除保险指令时,对其通电

产生热膨胀,通过固定锚点和可动部分的合理设置,解保孔沿着指定路线完成位移的输出,装置处于待发状态;并且当遇到紧急情况或发射之后未起爆,电热执行器电源断开,电热装置会随着热量的散发而恢复至原位置,再次使传爆孔错位达到安全状态,可以实现双向移动。

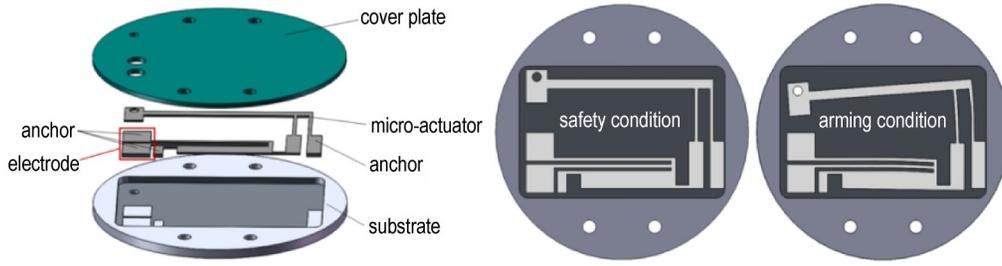


图8 安保机构安全与解保示意图

Fig.8 The structure of the safety and arming device

2 微安保机构激光加工的仿真与分析

2.1 激光烧蚀仿真参数设置

不同脉冲时间的激光对金属加工过程存在差异,为了分析激光切割金属效果,以探索微安保机构最优加工参数,分别对纳秒激光和飞秒激光烧蚀进行仿真分析,以金属镍为研究对象,模拟不同参数下激光烧蚀金属镍过程中的变化规律。

纳秒激光脉冲强度通常在时间上呈现高斯分布,因此也称为高斯脉冲,其能量密度与截面半径之间的关系为^[14]:

$$\varphi(r) = \varphi_0 e^{-2r^2/\omega_0^2} \quad (1)$$

式中, r 表示到光束中心的距离, μm ; φ_0 表示激光束的能量密度, $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$; ω_0 表示光束束腰半径, μm 。

与纳秒激光相比,飞秒激光在微零件的制造上具有显著的优势。飞秒激光作用在材料表面时,电子在吸收激光能量后温度瞬时达到峰值,这些电子通过电声耦合作用与晶格进行能量传递,晶格温度也随之上升最终实现热烧蚀加工^[15]。飞秒激光与材料的相互作用中,脉冲的持续时间小于温度达到平衡所需要的时间,经典的热传导模型不能准确反映激光的作用过程。通常采用双温模型^[16]来模拟飞秒激光与金属作用时电子系统和晶格系统的温度变化,一维双温模型方程的具体表达式如式(2)和式(3)所示:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_e \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) - g(T_e - T_i) + I(x, t) \quad (2)$$

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = g(T_e - T_i) \quad (3)$$

式中, T_e 为电子系统温度, K ; T_i 为晶格系统温度, K ; C_e 为电子热容, $\text{J}\cdot\text{K}^{-2}\cdot\text{m}^{-3}$; C_i 为晶格热容, $\text{J}\cdot\text{K}^{-2}\cdot\text{m}^{-3}$; k_e 为电子热导率, $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$; g 为电子与晶格之间的耦合参数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

式(1)右边第一项为电子与电子间的能量传递;第二项为电子与晶格能量耦合过程;第三项为在时间

和空间上分布的入射高斯激光热源;方程(2)为晶格温度变化方程。研究将从双温方程出发,选择激光波长为 1030 nm 的红光,模拟中激光的脉冲宽度为 240 fs ,重复频率为 1000 Hz 。

激光加工过程直接在空气中进行。分析所需镍材料的参数如表1所示。其中金属镍对 1030 nm 的激光的吸收系数以及反射率分别为 0.078 m^{-1} 和 0.744 ^[17]。

表1 镍材料参数^[18]

Table 1 Parameters of nickel material

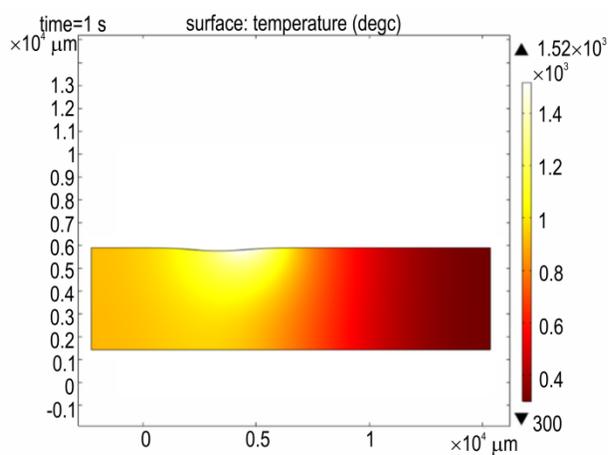
parameter	melting point / K	evaporation point / K	specific heat / $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	thermal conductivity / $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	density / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
value	1726	3003	440	91	8900

2.2 激光烧蚀过程仿真分析

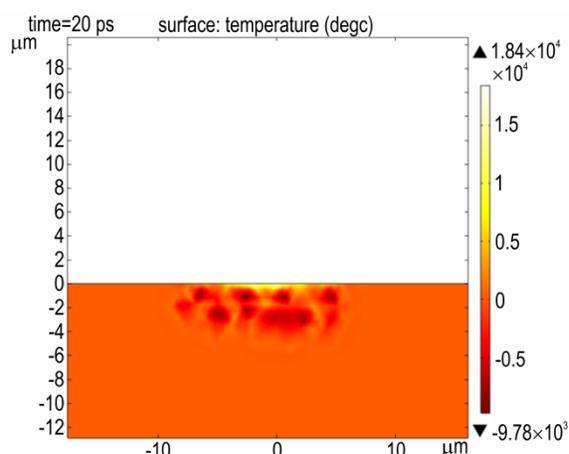
为研究纳秒激光与飞秒激光加工工艺对材料的影响,研究利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件进行仿真,计算得到的纳秒激光和飞秒激光分别烧蚀金属 1 s 、 20 ps 时材料内部温度分布,结果如图9所示。由图9a可见,纳秒激光加工过程中,热影响区较大,而温度的升高会造成材料重铸、加工残渣器件边缘翘曲变形等问题。图9b为飞秒激光加工过程中材料温度分布,其热影响区可以忽略不计,因而可以对几何形状精确控制。

对于飞秒激光,材料的去除主要是由相爆炸引起的,在模拟中,晶格温度达到 $0.9T_{cr}$,则认为该点发生烧蚀,材料以气相喷出,其中 T_{cr} 表示爆炸临界温度,金属镍 $T_{cr}=7810\text{ K}$ ^[19]。通过飞秒激光微加工镍金属的双温模型模拟,对金属中电子温度和晶格温度的变化规律进行研究,结果如图10所示。由图10可以看出,镍的电子晶格耦合时间大约为 5 ps ,此期间电子温度随时间呈先增加后减小的变化,而晶格温度则是缓慢增长,最终由于电子与晶格的相互作用,两者达到热平衡。飞秒激光加工过程中材料温度分

布,其热影响区可以忽略不计,对几何形状精确控制,因此,飞秒激光加工不会使材料发生热变形和热相变,呈现“冷加工”特性,保障了材料的机械性能和精度要求。



a. nanosecond laser



b. femtosecond laser

图9 纳秒激光与飞秒激光加工过程中材料温度分布

Fig.9 Material temperature distribution during nanosecond laser and femtosecond laser processing

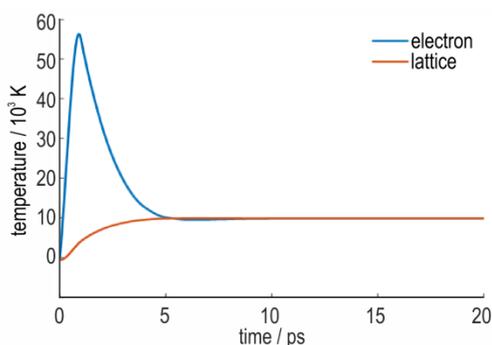


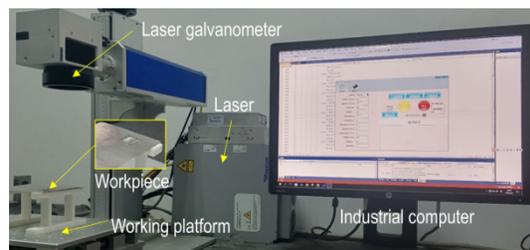
图10 镍金属表面电子和晶格温度随时间的变化规律

Fig.10 Variation of electron and lattice temperature on nickel metal surface with time

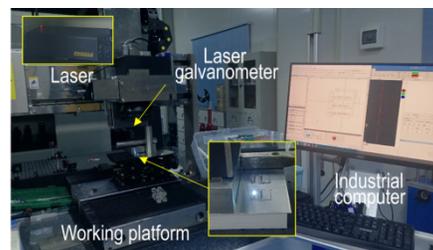
3 微安保机构实验验证与分析

3.1 激光加工工艺对比

为进一步优化工艺参数,研究利用激光加工镍基电热执行器,在纳秒、飞秒激光功率分别为9 W和18 W的条件下对0.3 mm厚度的金属镍进行了加工质量的研究,如图11所示分别为纳秒激光和飞秒激光加工实验平台。



a. nanosecond laser processing platform



b. femtosecond laser processing platform

图11 激光加工平台

Fig.11 Laser processing platform

结果如图12所示。由图12a的纳秒激光切割加工件的边缘形貌可见,加工件存在粘连现象,加工边缘毛刺严重的问题,且功率越高烧焦现象越明显。图12b为飞秒激光切割加工件的边缘形貌可见,相同功率条件下,与纳秒激光相比,飞秒激光切割边缘几乎没有被烧蚀的痕迹,并且功率较小(9 W)的切割加工件边缘更平整。图12c为激光功率为9 W时飞秒激光和纳秒激光切割侧壁的对比如,由图11c可以看出,纳秒激光切割的侧壁存在严重的不平整度,飞秒激光侧壁光滑统一,但飞秒激光切割边缘却存在不垂直现象,这是因为为了避免粘连,将材料悬空进行加工,多次切割后,材料会存在下坠现象,导致后面的切缝与初始切缝没有完全重合。

虽然功率越小,温度越低,但随着重复的增加,边缘平整性就会减弱。为此,为达到最好的加工效果,最轻的烧蚀,且零件能够被切穿的目标,研究综合考虑工作效率和工件质量,采用飞秒脉冲激光器重复进行300次的零件加工,基中激光功率为9 W,切割速度为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,脉冲宽度240 fs,结果如图13所示,由

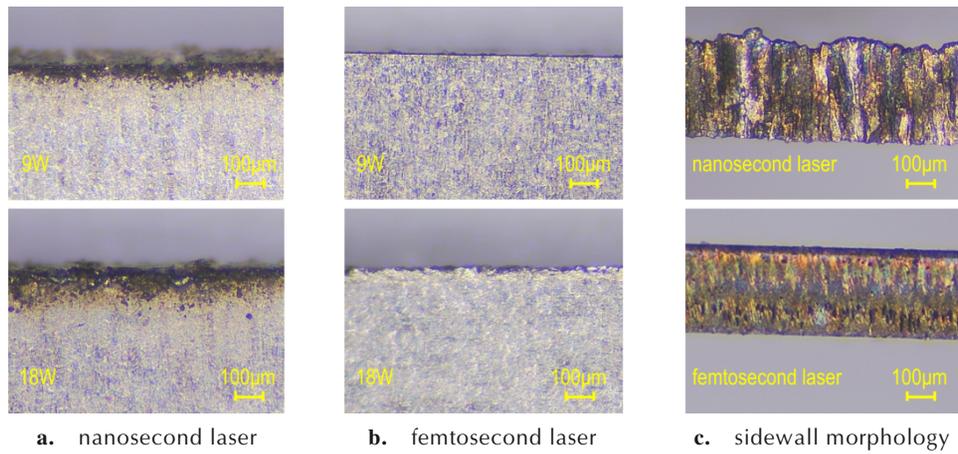


图 12 纳秒激光与飞秒激光加工形貌对比

Fig.12 Comparison of morphology between nanosecond laser and femtosecond laser processing

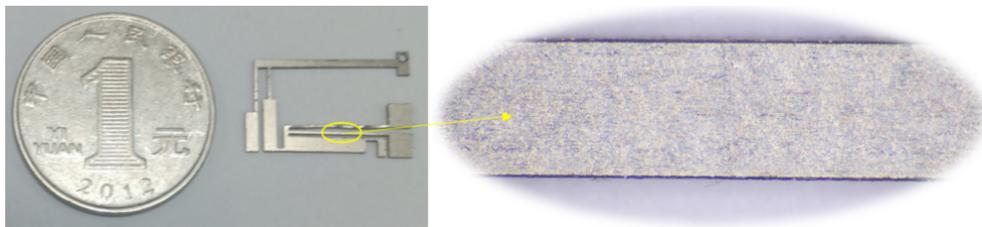


图 13 飞秒激光加工样品图

Fig.13 Femtosecond laser processing sample

图 13 可以看出飞秒激光加工的样品表面平整,切割边缘无烧焦。

3.2 驱动性能验证

为验证安保机构作动可行性,研究搭建了实验平台(图 14),直流稳压电源(加载电流为 5、6、7、8 A)对安保机构输入不同电流激励,通过显示器观察显微镜对安保机构放大之后的做动情况,并测量了安保机构末端位移,实验结果如图 15 所示,并与图 6a 的仿真结果进行了对比分析。

由图 15 可知,通过初步测试,该安保机构在加载 8 A 电流时,可以在 1 s 内完成初步解保动作。由于实验过程中金属受热会产生弯曲,不能保证伸长量都在

输出位移的方向,此外,实验测试过程中,会引入传输线及接线端阻抗,导致实际加载的电流小于仿真分析结果,所以实验结果略小于仿真结果。考虑电流过大导致热臂变形严重,甚至发生不可逆现象,因此实验中电流加载到 8 A,有效保护器件的同时满足位移需求。由于起爆药剂分解温度为 215 °C,通过实验验证,与起爆药接触的隔爆块通电前温度为 24.9 °C,通电 1 s 之内,最高温度 26.5 °C,与传爆药接触的基底通电前最高温度为 25.3 °C,通电 1 s 之内,底部最高温度 53.1 °C,均满足安全解保要求。

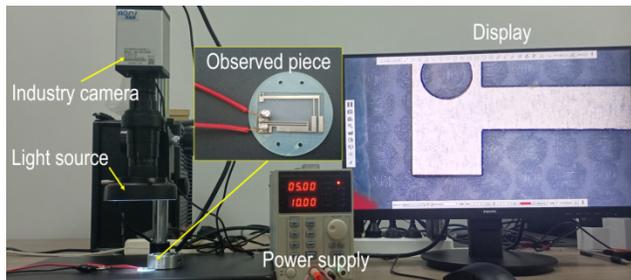


图 14 安保机构测试实验平台

Fig.14 Test experimental platform of safety and arming device

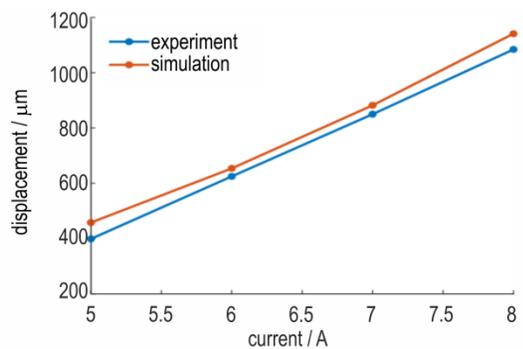


图 15 样品输出位移测试结果与仿真对比曲线

Fig.15 Comparison between the test results and simulation results of the output displacement of the sample

3.3 微组装与隔爆验证

安保机构试验样品如图 16a 所示,总体框架采用 3D 打印制作。由于微安保机构为导电金属,为了不影响机构在总传爆序列中的作用,底板和盖板选择脆性耐高温绝材料,其中底板选择绝缘环氧玻璃纤维板,采用数控机床在底板内部加工固定锚点的凸起,盖板选择石英玻璃,采用飞秒激光加工传爆孔以及引线预留孔;在底板凸起表面涂抹密封胶,将安保机构锚点与底板凸起进行固定组装,再将盖板与底板四周用螺栓固定,并嵌入铝制外壳凹槽内。最后将控制电路集成在系统中,形成完整的火工品微系统。

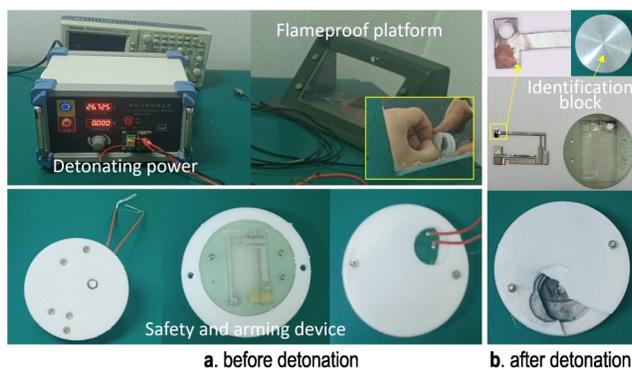


图 16 火工品安保机构隔爆功能性实验

Fig.16 Experimental device before and after detonation

为验证隔爆效果,起爆鉴定块与基底紧密贴合,将程控水银起爆装置引线与起爆器引线相接,利用电容放电对起爆器进行激励。被隔爆的微雷管由 Prex7740 玻璃衬底、制作在玻璃衬底上的 Ni-Cr 桥膜上的换能元、含有装药腔体的硅片层以及含能材料构成。在微雷管的装药腔体中进行纳米多孔叠氮化铜的原位生成。装药腔体尺寸为 $\Phi 1.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$, 平均装药密度为 $1.93 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。传爆药采用 CL-20 装药,利用压装技术制成,所用装药直径为 3 mm,药柱高度为 3.5 mm,装药量约为 50 mg,装药密度约为 $1.67 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,鉴定块为铝块。起爆后的安保机构状态如图 16b 所示,其中隔爆块有明显的冲击凹痕,但并未破裂,传爆药未引爆并且鉴定块无冲击凹痕,表明该安保机构具有良好的安全隔爆功能。

4 结论

为了满足火工品可恢复式微安保机构的发展需求,本研究对基于激光加工的微安保机构进行了设计与性能研究,结论如下:

(1) 设计了适用于微尺度传爆系统的可恢复式微

安保机构,提出了基于柔顺机构放大原理的电热驱动的微安保机构执行器件,利用金属镍设计并制备了安保机构;

(2) 对不同参数的 U 型双热臂电热驱动器单元的有限元仿真分析表明,在相同的激励下,U 型双热臂电热执行各臂宽度以及间隙越小,输出位移越大,长度在一定范围内越长,输出位移越大;

(3) 分别利用纳秒和飞秒激光进行了实际加工,其中纳秒激光热影响区较大,样品存在粘连和翘曲现象,且边缘毛刺较多,飞秒激光加工的样品平整且边缘光滑,精度更高;

(4) 仿真与实验结果表明,所设计和制造的镍基电热执行器可以在电流激励下实现较大的输出位移,并且能够有效隔爆,可用于小型化可恢复式微安保机构设计,后续可结合解保及起爆电路,优化组装工艺,进一步提升电火工品综合性能。

致谢:感谢西安电子科技大学分析测试共享中心的技术支持。

参考文献:

- [1] 褚恩义, 陈建华, 张蕾, 等. 火工品的基础问题及技术发展[J]. 含能材料, 2023, 31(6): 527-530.
CHU En-yi, CHEN Jian-hua, ZHANG Lei, et al. Basic problems and technical development of initiating explosive devices [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(6): 527-530.
- [2] ZHANG Y, XIAO Z, LIU L, et al. Research on the Output Characteristics of Energy Conversion Elements under External Excitation[J]. *Micromachines*, 2023, 14(3): 549.
- [3] ROBINSON C H, WOOD R H, HOANG T Q. Development of inexpensive, ultra-miniature MEMS-based safety and arming (S&A) device For small-caliber munition fuzes[M]. US: Army Tank Automotive Command (TACOM) Armament Research, Development and Engineering Center (ARDEC) Fuze Division.
- [4] SEOK J O, JEONG J, EOM J, et al. Ball driven type MEMS SAD for artillery fuse[J]. *Journal of micromechanics and micro-engineering*, 2016, 27(1): 15032.
- [5] 吴志亮. 特种小型机电引信设计及关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
WU Zhi-liang. Design and Research on the key technologies for small electro-mechanical fuze[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [6] PEZOUS H, ROSSI C, SANCHEZ M, et al. Integration of a MEMS based safe arm and fire device[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 159(2): 157-167.
- [7] 王柯心, 胡腾江, 赵玉龙, 等. 一种内置双层电热 MEMS 安保机构的微点火序列[J]. 含能材料, 2023, 31(3): 229-234.
WANG Ke-xin, HU Teng-jiang, ZHAO Yu-long, et al. Design of a MEMS ignition device with a double-layer barrier

- electro-thermal safety and arming device [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31 (3): 229-234.
- [8] 朱珊. 引信安全状态恢复功能分析及其实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
ZHU Shan. Analysis and realization of fuze safety state recoverable function [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- [9] 朱珊, 李豪杰. 基于滑块继续运动的安全状态可恢复隔爆机构[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(3): 39-42.
ZHU Shan, LI Hao-jie. The safety state restoration of interrupter mechanism by slider keeping move[J]. *Journal of Detection & Control*, 2010, 32(3): 39-42.
- [10] LAI Y, BORDATCHEV E V, NIKUMB S K, et al. Performance Characterization of In-plane Electro-thermally Driven Linear Microactuators [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2006, 17(10): 919-929.
- [11] WANG X, LU P, DAI N, et al. Femtosecond laser direct fabrication of metallic microcantilevers for a micro-corrosion-fatigue test [J]. *Journal of micromechanics and microengineering*, 2007, 17(7): 1307-1313.
- [12] 李艳桥. 微机电引信安全与解除保险装置结构设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
LI Yan-qiao. Structure design of safety and arming device for micro-electro-mechanical fuze [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- [13] 王志陶. 电热微致动器的多能量域建模与仿真技术研究 [D]. 河北: 燕山大学, 2006.
WANG Zhi-tao. Multi-energy modeling and simulating technology research for electro-thermal actuators [D]. Hebei: Yan-shan University, 2006.
- [14] 黄楷. 纳秒激光与金属材料相互作用过程及微结构加工研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
HUANG Kai. Interacting process and microstructure machining on metal materials by nanosecond laser ablation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [15] KIRAN KUMAR K, SAMUEL G L, SHUNMUGAM M S. Theoretical and experimental investigations of ultra-short pulse laser interaction on Ti6Al4V alloy [J]. *Journal of materials processing technology*, 2019, 263: 266-275.
- [16] 李成玉. 基于COMSOL的皮秒激光烧蚀304不锈钢仿真与实验研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
LI Cheng-yu. Simulation and experimental research on picosecond laser ablation of 304 stainless steel based on COMSOL [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [17] JOHNSON P, CHRISTY R. Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd [J]. *Physical Review B*, 1974, 9(12): 5056-70.
- [18] 王志军, 贾威, 倪晓昌, 等. 飞秒激光烧蚀金属镍热影响区的数值模拟 [J]. 激光技术, 2007, (06): 578-80.
WANG Zhi-jun, JIA Wei, NI Xiao-chang, et al. Numerical simulation of femtosecond laser ablation of nickel heat affected zone [J]. *laser technology*, 2007, (06): 578-80.
- [19] 王志军. 飞秒激光与金属材料相互作用研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
WANG Zhi-jun. Study on the interaction between femtosecond laser and metal materials [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.

Design and Performance of Micro Safety and Arming Device Based on Laser Processing

ZHANG Yun¹, JIANG Qian¹, LIU Wei², XIE Rui-zhen², REN Xiao-ming², LIU Lan²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

Abstract: In complex environment, the micro safety and arming (S&A) device of initiating explosive device needs to have recoverable and anti-overload characteristics. Therefore, this study designed a metal-based electrothermal-driven micro S&A device based on laser processing. The finite element simulation was used to analyze the action characteristics of the nickel-based micro-electrothermal actuator. By adjusting the length and width of the hot arm and the cold arm of the double-arm U-shaped electrothermal actuator and the gap between the arms, the influence of them on the output displacement was explored. Through orthogonal experiments, the optimized ultra-fast laser processing parameters were obtained as follows: frequency 100 kHz, energy 113 μJ , and cutting speed 100 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. The ultra-fast pulse laser precision manufacturing of nickel-based electrothermal micro S&A device was realized. Finally, the performance verification platform of the micro S&A device was built, the driving displacement and explosion-proof performance of the mechanism under different current excitations were verified. The results show that the driving displacement of the processed micro S&A device can reach 1084 μm under the excitation current of 8 A, and the assembled micro S&A device of initiating explosive device can effectively isolate the explosion in the explosive sequence.

Key words: electrothermal drive; micro-electromechanical system (MEMS); micro safety and arming (S&A) device; laser processing

CLC number: TJ5; TI45; T15

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023032

Grant support: Key Research and Development Program in Shaanxi Province of China (No. 2023-YBGY-333), Innovation Capability Support Program of Shaanxi (No.2023-CX-PT-30)

(责编: 姜梅)