# 光泽金属的激光精密刻蚀实验研究

王宏杰,高金富,高 扬,董 玥,吕福云

(南开大学 物理科学学院,天津 300071)

**摘 要**:采用 266 nm 或 355 nm 的紫外激光器可以对微小的金属薄膜器件直接进行激光精密加工。但是,目前紫外激光器的输出功率普遍较低,以至于还不能对大幅面、深尺度的光泽金属进行激光加工。为了克服光泽金属对大功率固体激光器输出的 1 064 nm 激光的高反射率和散热快问题,采用了优化谐振腔和扫描聚焦系统的光学方法,实现了激光单模运转,功率密度达到了 $1.592\times10^9$ W/cm$^2$,由此也使得加工工件通过原子吸收激光能量的方式改变为通过金属中的自由电子的等离子体激射来吸收激光能量。在平均功率为 50 W、重复频率为 500 Hz、焦斑直径小于 20 μm、脉冲宽度为 80 ns、切割速度为 10 mm/s 的加工条件下,对厚度为 10 mm 的大尺寸紫铜板直接进行了激光精密刻蚀实验,切割的槽宽和槽深均为 100±10 μm;槽间距为 300±15 μm,均达到了初始设计的指标要求。

**关键词**:激光加工; 光泽金属; 高亮度

**中图分类号**:TN249 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2014)05-1473-04

# Experimental research on laser minutely cutting shine metal

Wang Hongjie, Gao Jinfu, Gao Yang, Dong Yue, Lv Fuyun

(School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract**: Micro devices of metal thin film may be directly processed by utilizing the UV laser at the wavelegth of 266 nm or 355 nm. However, due to the output power of UV laser is common lower at present, it is not suitable for directly processing the shine metal with the larger size and thick. In this experiment, in order to overcome the problems that shine metal possess the high reflectivity to the solid state laser of high power at 1 064 nm and the fast heat dissipation, the resonant cavity and the scanning focusing system were optimized, then the laser single mode operation was realized and the power density was reached $1.592\times10^9$ W/cm$^2$, which also make that the absorption of laser energy by atom changes into the absorption way by the plasma emission of the free electrons in the metal. Utlizing to the laser of average power of 50 W, repetition frequency of 500 Hz, spot diameter of 20 μm, pulse duration of 80 ns, cutting velocity of 10 mm/s, the bigger copperplate with thick of 10 mm was directly processed accurately, the width and deepth of the groove by laser cutting were all 100±10 μm, and the groove spacing was 300±15 μm, that were enough satisfied the initial target.

**Key words**: laser processing; shine metal; high brightness

---

**收稿日期**:2013-09-15; **修订日期**:2013-10-24

**基金项目**:国家基础科学人才培养基金(J1103208)

**作者简介**:王宏杰(1959-),男,高级工程师,主要从事光电子激光技术的研究。Email: wang_hj@nankai.edu.cn

## 0 引 言

目前激光技术在各行各业中得到了极其广泛的应用,并在许多方面替代了传统的机械加工、电火花加工、化学刻蚀等复杂的工艺技术,彰显出其独特的优势和先进性。近年来发明的激光表面织构化、激光表面涂覆、激光掺杂等工艺形成了一整套崭新的激光再制造技术,带来了工业领域又一次革命性的进步[1-4]。然而,由于光泽金属表面对可见和近红外光具有极高反射率,其吸收系数近似为零。所以,采用以红外波段输出为主的 Nd:YAG 固体激光器、二氧化碳激光器无法直接对光泽金属进行激光加工。过去常采用电火花法对光泽金属进行精密加工,但工艺复杂、且精度欠佳。或采用化学黑化法对光泽金属表面腐蚀处理后再进行激光加工,其效果也不理想。并且,以上两种加工方式对工件均有破坏性、成本很高昂。据报道,美国 Applied Material CO.首先采用功率为 3 W、波长为 266 nm 深紫外连续激光,实现了对透明材料和光泽金属的精密加工。在国内,北京工业大学阳建华等人[5]采用最高功率为 10 W、波长为 355 nm 的准连续紫外激光,在较低气压的氮气保护下对厚度约 100 μm 紫铜薄膜进行了激光精密加工,取得了较好的实验结果。另外,该校的蒋茂华等人[6]采用重复频率为 2.5 kHz、波长为 355 nm 脉冲式紫外激光对光泽金属进行了烧结实验。结果发现,该波段的紫外激光波长短、单光子能量大、容易被吸收,并且作用时间短、热影响区小,优于近红外波段的光纤激光器的加工效果。虽然,采用266 nm 或 355 nm 的紫外激光能实现对微小的光泽金属器件进行激光精密加工,但是,由于目前紫外激光器的输出功率普遍较低(连续功率小于 50 W),所以,还不能实现对大幅面、深尺度的金属进行激光加工。文中通过改善光束质量和提高功率密度的方法,采用高亮度、高能量密度的 Nd:YAG 固体激光器在尺寸为135 mm 长、113 mm 宽、10 mm 厚的紫铜板上直接实现了激光精密加工。切割的槽宽和槽深均为 100±10 μm;槽间距为 300±15 μm,满足了工程实际应用的要求,为广州有色金属研究院承担的 973 项目解决了一个工艺环节难题,具有一定实际应用意义。

## 1 实验装置和内容

### 1.1 实验装置

为实现高亮度和高功率密度的激光输出,所采用的 Nd:YAG 固体激光器的谐振腔和聚焦系统都做了一些改进[7]。如在谐振腔中加入了双小孔限模装置,孔径为 1 mm。在保证输出功率损失不大的情况下,尽可能加大谐振腔的长度至 800 mm。同时,采用超短焦距的扫描透镜确保焦斑直径小于 20 μm。该实验装置输出的激光波长为 1 064 nm,平均功率为 50 W,重复频率为 500 Hz,脉冲宽度为 80 ns。激光加工条件:切割速度为 10 mm/s;在空气中直接切割,未充保护气体;对样品未作任何处理。实验装置如图 1 所示。

图 1 实验装置

Fig.1 Experimental equipment

### 1.2 实验内容

该实验是为了配合广州有色金属研究院承担的 973 项目而设计。该项目研制过程中,需要使用两块表面镀有稀土金属钨的紫铜板作反应堆挡板。为增加膜层牢固度,特提出在紫铜板上预先刻蚀出槽宽和槽深均为 100 μm 的网格。按照其设计要求,使用改进后的 Nd:YAG 固体激光器加工成了两块样品。图 2 所示是用型号为 M205C 显微镜实际观测到的切槽宽度和槽间距的结果(200 倍率)。水平方向上槽宽为 109 μm、槽间距为 308 μm;竖直方向上槽宽为 104 μm、槽间距为 310 μm。槽深是通过在铜板表面和槽的底部两次聚焦成像后,用二者的焦距差估算

出来的,其数值大约为 100 μm。实验中,测量到的各项参数均达到了当初设计指标的要求, 广州有色金属研究院课题组的科研人员对上述实验结果表示满意,并出具了各项参数验收合格的证明。

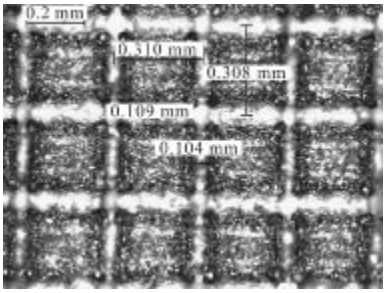


图 2 切槽的显微照片

Fig.2 Cut-groovy microgram

## 2 实验方案及结果的分析

### 2.1 金属吸收率与波长的关系

以材料学为依据, 浙江大学陈君等人从菲涅耳公式出发, 推算出了金属材料激光吸收率的近似公式如下[8]:

$$A=0.1475\sqrt{\frac{\rho}{\lambda}} \tag{1}$$

式中: **A** 为吸收率; $\rho$ 为电阻率; $\lambda$ 为激光波长。

公式(1)表明:金属材料吸收率与入射激光波长平方根近似成反比。即波长短的单光子能量大,与金属自由电子能量比较接近,二者通过相互作用,使金属产生了吸收。而长波长的单光子能量低, 与自由电子能量相差甚远,尤其是在功率密度比较低(如 $10^4$~$10^6$ W/cm$^2$)时,金属表面自由电子对长波长的近红外激光就形成完全反射,近乎不吸收。

图 3 是几种常见的光泽金属吸收曲线。从图中同样可见, 光泽金属在长波段对激光吸收率非常低,而随着波长变短, 吸收率迅速增大。相对于铜金属而言,对 1 064 nm 的 Nd:YAG 激光吸收率仅略大于 10%,而对 355 nm 紫外光吸收率大于 55%,对 266 nm 深紫外光吸收率更大于 65% 。由此可知,对铜金属进行激光加工时应首选紫外或深紫外光源激光器,可直接实现激光精密加工。但是, 由于目前此类型的短波长激光器输出功率普遍较低, 面对大幅面、深尺度的激光加工时就遇到了困难。采用普通的 Nd:YAG 固体激光器对紫铜板曾进行了激光刻蚀,正是由于反射率过高, 初次实验并未获得成功。故而,我们对原有的 Nd:YAG 固体激光器的谐振腔和扫描聚焦系统进行了优化, 最终实现了对光泽紫铜板直接进行激光精密刻蚀。

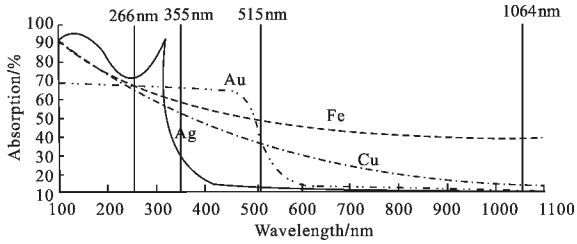


图 3 几种常见的光泽金属吸收曲线

Fig.3 Absorption curves of several familiar shine metals

### 2.2 金属吸收率与功率密度的关系

从吸收率公式及其分析可知, 金属材料对激光的吸收系数主要取决于三个因素:波长、功率密度和温度。实际上,温度的影响是微乎其微的。并且,要改变工件的温度是难以实现的, 需要在加工平台上安装控温炉,故该方案不可行。采用短波长的紫外激光器是首选方案,前文已经讨论过了。在此主要论述通过加大激光功率密度来提高光泽金属的吸收率,从而实现激光精密刻蚀。如前所述,当功率密度达到 $10^4$~$10^{11}$ W/cm$^2$ 时,才能实现激光加工过程。当功率密度较低,如在 $10^4$~$10^6$ W/cm$^2$ 时,激光辐照金属材料后只能发生类似退火、表面改性、表面合金化和焊接等过程。这些过程是以工件吸收激光能量转化为热能,使其温度升至熔点附近出现熔融、熔化、或少量的气化现象为主,这一类属于低温激光加工过程。而当功率密度足够大, 比如达到 $10^9$ W/cm$^2$ 以上时,激光辐照金属材料后将以发生气化和等离子激发为主。此过程对应于激光深度标识、激光打孔和激光切割等去除式或分离式的加工过程。在该过程中,被加工物体是从固态气化成蒸汽而挥发掉、或被惰性气体吹离工作平台,这一类属于高温激光加工过程。然而, 对于激光精密加工过程不仅需要足够大的功率密度,更重要的是要达到足够高的激光亮度。在此情形下, 激光是以电磁波的形式与金属内的自由电子形成强相互作用,发生由量变到质变的过程,这是一个量子物理的过程。实际上,就是由于激光高能量密度的存在,从而才激发了金属等离子体的产生,并使

其得以逸出金属表面,这就是高亮度、高能量密度激光直接刻蚀光泽金属所发生的微观过程。如前所述,实验中我们改进后的激光焦斑直径仅为 20 μm、脉冲宽度为 80 ns,这些参数的改善极大地提高了激光能量密度。计算后可知,此时功率密度为 $1.592\times10^{9}$ W/cm$^2$,已达到高功率激光加工的基本要求。由此验证,实验结果与理论分析相吻合。另外,实验中发现,当功率密度大于 $10^{10}$ W/cm$^2$ 时,由于激光能量密度过大,致使等离子体激发过于激烈,产生了“飞溅”现象,造成切槽边缘不整齐、存在大量堆积物,反而影响了加工效果。

## 3 结 论

(1) 对于微小的光泽金属器件(例如,金属薄膜)进行激光加工时, 应首选短波长的紫外或深紫外光源激光器,可直接实现激光精密加工。

(2) 对于大尺寸的光泽金属(例如,金属板材)进行激光加工时, 可选择高亮度、高能量密度的 Nd:YAG 固体激光器或光纤激光器,但要求激光束单模运转、且功率密度需达到 $10^{9}$ W/cm$^2$ 以上,也可直接实现激光精密加工。

(3) 工业中常用的二氧化碳激光器的波长为 10.6 μm,其焦斑直径大于 100 μm,且光束质量差,所以,该类激光器不适用于激光精密加工。

## 致 谢

实验中曾与广州有色院杨振晓硕士进行过有益探讨,并得到了他们的资助。在此表示感谢!

**参考文献:**

[1] Palina N, Chen J, Aberle A G, et al. Enhancement of laser-induced rear surface spallation by pyramid textured structures on silicon wafer solar cells [J]. Optics Express, 2012, 20(23): A984-A990.

[2] Ma Xiaoyu, Wang Jun, Liu Suping, et al. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor lasers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 189-194. (in Chinese)
马骁宇, 王俊, 刘素平, 等. 国内大功率半导体激光器研究应用现状[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 189-194.

[3] Xu Kaida, Jin Weiqi, Liu Jing, et al. Non-line-of-sight imaging based on laser range-gated imaging technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2073-2078. (in Chinese)
许凯达, 金伟其, 刘敬, 等. 基于激光距离选通成像的非视域成像应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2073-2078.

[4] Wang Lexin, Zhao Zhimin, Wang Chang, et al. Experiment on the impact of light repair technique on the material properities [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2480-2483. (in Chinese)
王乐新, 赵志敏, 王畅, 等. 光修复技术对材料性能影响的实验[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2480-2483.

[5] Yang Jianhua, Chen Jimin, Zuo Tiechuan. High power ultraviolet laser precision cutting [J]. Chinese Journal of Laser, 2006, 33(S): 423-426. (in Chinese)
阳建华, 陈继民, 左铁钏. 高功率紫外激光精密切割 [J]. 中国激光, 2006, 33(S): 423-426.

[6] Jiang Maohua, Zhai Libin, Chen Jimin. Experimental research on fiber laser micro-cutting Co-Cr tube [J]. Microfabrication Technology, 2008(4): 27-31. (in Chinese)
蒋茂华, 翟立斌, 陈继民. 激光微切割钴铬管的实验研究[J]. 微细加工技术, 2008(4): 27-31.

[7] Jiang Kai, Zhou Sizhong, Wang Yanbin, et al. Design of 30x middle infrared continuous zoom system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2162-2166. (in Chinese)
姜凯, 周泗忠, 王艳彬, 等. 30X 中红外连续变焦光学设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2162-2166.

[8] Chen Jun, Zhang Qunli, Yao Jianhua, et al. Study on laser absorptivity of metal material [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(5): 793-798. (in Chinese)
陈君, 张群莉, 姚建华, 等. 金属材料的激光吸收率研究[J]. 应用光学, 2008, 29(5): 793-798.