

文章编号 1004-924X(2012)01-0045-07

0Cr18Ni9 不锈钢箔的飞秒激光烧蚀

徐 斌¹, 伍晓宇^{1*}, 罗 烽¹, 杜晨林², 孙秀泉²

(1. 深圳大学 机电与控制工程学院 深圳市模具先进制造技术重点实验室, 广东 深圳 518060;

2. 深圳大学 电子科学与技术学院 深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要:利用飞秒激光对厚度为 20 μm 的 0Cr18Ni9 不锈钢箔进行了表面烧蚀、微细切割等试验,并研究了不锈钢箔的烧蚀特性。首先,根据烧蚀区域的直径和脉冲能量的关系,得到了 0Cr18Ni9 不锈钢箔的单脉冲烧蚀阈值,并估算了飞秒激光的束腰半径。然后,对飞秒激光切割不锈钢箔的边缘进行金相观察并测试了切割试件的电阻率,以确定飞秒激光切割对不锈钢箔的热影响。最后,对切割试件进行 X 射线衍射分析(XRD),以确定飞秒激光切割对不锈钢箔物相组成的影响。实验结果表明:飞秒激光的束腰半径为 10.416 μm ;厚度为 20 μm 的 0Cr18Ni9 不锈钢箔的单脉冲烧蚀阈值为 0.455 J/cm^2 ;飞秒激光切割后试件的金相组织处于回复阶段,因此金相组织不会产生明显变化;飞秒激光切割后不锈钢箔的物相组成没有变化,但物相的相对含量发生了改变。

关键词:飞秒激光;激光烧蚀;激光切割;不锈钢箔;X 射线衍射分析

中图分类号:TG156.99;TG485 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122001.0045

Ablation of 0Cr18Ni9 stainless steel films by femtosecond laser

XU Bin¹, WU Xiao-yu^{1*}, LUO Feng¹, DU Chen-lin², SUN Xiu-quan²

(1. Shenzhen Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Mold & Die, College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

* Corresponding author, E-mail: wuxy@szu.edu.cn

Abstract: The 0Cr18Ni9 stainless steel film with a thickness of 20 μm was ablated and cut in a micro-machining. Firstly, the ablation threshold of 0Cr18Ni9 stainless steel film and the beam waist radius of a femtosecond laser were obtained based on the functional relationship between ablation area and laser energy. Then, the metallographic phase and electrical resistivity of the stainless steel film ablated by the femtosecond laser were researched in detail to observe the heat effect caused by the laser. Finally, in order to research the effect of femtosecond laser ablation on the phase composition of the stainless steel film, specimens were tested by X-ray Diffractometry(XRD). Experimental results demonstrate that the waist radius of femtosecond laser is 10.416 μm and the ablation threshold of the stainless steel film with a thickness of 20 μm is 0.455 J/cm^2 . The metallographic phase of specimens

收稿日期:2011-07-11;修订日期:2011-09-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175348);深港创新圈计划资助项目(No. ZYB200907090135A);广东省教育厅重点实验室开放基金资助项目(No. 201002)

cut by the femtosecond laser is in a recovery process, and its metallographic phase is not changed. The phase composition of stainless steel film is not affected by the femtosecond laser cut, however, the content of phase has been changed.

Key words: femtosecond laser; laser ablation; laser cutting; stainless steel film; X-ray Diffractometry (XRD)

1 引言

近几年,飞秒激光以能量密度高、烧蚀阈值确定、热影响区小、加工材料广泛等优点被广泛地应用于微细加工领域。各国学者纷纷利用各种技术对飞秒激光与物质的相互作用机理展开研究。D. V. Tran 等人通过红外热像技术实现了飞秒激光烧蚀不锈钢、铜、硅等材料时温度场的直接观测,并对烧蚀过程中的能量累积现象做出了分析和量化^[1-3]。H. Y. Zheng 等人利用扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)对飞秒激光微加工的硅片进行观测,发现有纳米量级的粒子覆盖在硅片表面^[4]。A. Borowiec 等人利用透射电镜(Transmission Electron Microscope, TEM)对飞秒激光烧蚀磷化钢晶体所产生的波纹状周期结构进行了观察和研究^[5-6]。国内学者也展开了对飞秒激光烧蚀各种材料特性的研究,取得了显著成果,并将其应用到了相关的微细加工领域^[7-12]。但是,上述研究鲜有从金相、电阻率以及 X 射线衍射(X-Ray diffractometry, XRD)检测等角度对材料的飞秒激光烧蚀特性展开研究的报道。厚度为 20 μm 的 0Cr18Ni9 为奥氏体不锈钢,因其良好的耐腐蚀性、低温性能、热加工性以及高强度特别适合作为高端模具材料。文献[13]提出了以厚度为 5~20 μm 的 0Cr18Ni9 不锈钢箔为基材,采用飞秒激光切割和电阻滑焊相结合的工艺制备微型模具的新工艺。本文在此基础上进一步从制备微模具工艺的角度考虑,从金相、电阻率以及 XRD 检测等方面展开对飞秒激光烧蚀 0Cr18Ni9 不锈钢箔的研究,从而为飞秒激光与 0Cr18Ni9 不锈钢箔的相互作用机理提供相应的实验依据和理论分析,并为微模具制备工艺中飞秒激光切割 0Cr18Ni9 不锈钢箔提供合理的工艺参数。

2 实验装置与方法

实验材料是 0Cr18Ni9 不锈钢箔,厚度为 20 μm ,实验前后试样均在超声波清洗机中用浓度为 95% 的酒精溶液进行清洗。实验装置如图 1 所示。实验采用美国 COHERENT 公司生产的掺钛蓝宝石飞秒激光器,振荡级型号为 Mira900,放大级型号为 RegA9000,飞秒激光器的具体参数为:最大能量为 4 μJ ,脉宽为 200 fs,中心波长为 800 nm,脉冲重复频率为 250 kHz。试验中采用光学快门来控制曝光脉冲数,使用衰减镜来调节飞秒激光的功率;XY 运动平台为德国 PI 公司生产的高精密运动平台,型号为 M511. D,其运动精度可达 0.2 μm ;试件放在 XY 精密运动平台上,飞秒激光光束经过反射镜折射和物镜(10 \times)聚焦后垂直照射在试件表面。

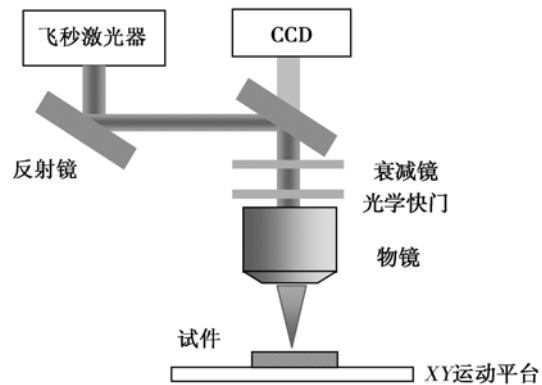


图 1 飞秒激光烧蚀实验装置图

Fig. 1 Experiment setup of femtosecond laser ablation

烧蚀实验在室温下进行,并通过 CCD 镜头来实时观测飞秒激光烧蚀不锈钢箔的情况,试件的切割速度为 60 mm/min,切割的钢箔试件为 5 mm \times 5 mm 的方块。切割后的试件通过冷镶嵌的方式固定,通过打磨、抛光、10% 草酸溶液的电解腐蚀观察其切割边缘的金相组织,从而确定切

割边缘金相组织的变化。测量被不同功率的飞秒激光切割后试件的电阻率,电流通过毫安表读出,电压稳定在 10 V。通过 X 射线衍射仪对切割后的试件进行分析,从而得到切割后试件的物相组成及物相相对含量的变化。

3 实验结果及分析

3.1 0Cr18Ni9 不锈钢箔的单脉冲烧蚀阈值

在飞秒激光与物质的相互作用中,材料的烧蚀阈值是一个重要的参数。材料的烧蚀阈值就是对表层材料产生不可逆的破坏时所需要的能量密度^[14],并且同一种材料的单脉冲烧蚀阈值 Φ_{th} 是确定的。对于激光强度为高斯分布的飞秒激光的 Φ_{th} 可以通过测量烧蚀区的直径 D 以及飞秒激光的脉冲能量 E_p 得到^[14-15],三者的关系如式(1)所示。因此,对于 0Cr18Ni9 不锈钢箔的飞秒激光单脉冲烧蚀阈值也可以采用上述原理进行测量。

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln \frac{E_p}{\pi\omega_0^2 \Phi_{th}}, \quad (1)$$

其中 ω_0 为飞秒激光的束腰半径,对式(1)进行转换可得

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln 2 + 2\omega_0^2 \ln E_p - 2\omega_0^2 \ln \pi\omega_0^2 \Phi_{th}. \quad (2)$$

对式(2)进行分析可以知道:由于 ω_0 与 Φ_{th} 均为定值,因此烧蚀区直径的平方和飞秒激光脉冲能量的对数值是线性关系。在测定烧蚀阈值时,烧蚀区域的直径用光学显微镜测量(如图 2 所示),对应于每个脉冲能量进行 4 次打孔,取烧蚀直径的平均值。对实验数据进行直线拟合(如图 3 所示),可得到直线的斜率 k 为 217,因此利用式(2)求

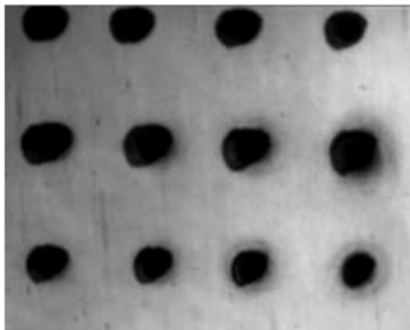


图 2 不同功率的飞秒激光在不锈钢箔上打点

Fig. 2 Ablation zone of stainless steel films with different energies

得飞秒激光的束腰半径为 $10.416 \mu\text{m}$ 。当烧蚀区直径 D 为零时,飞秒激光的能量密度被认为是 0Cr18Ni9 不锈钢箔的烧蚀阈值。通过上述的已知条件可以求得厚度为 $20 \mu\text{m}$ 的 0Cr18Ni9 不锈钢箔的单脉冲烧蚀阈值为 $0.455 \text{ J}/\text{cm}^2$ 。

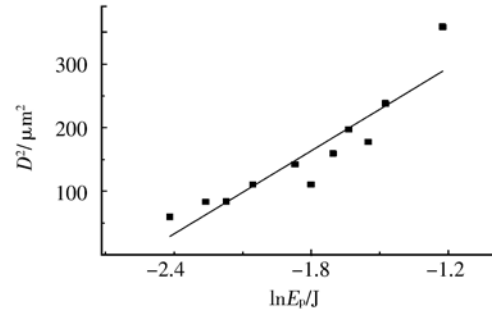
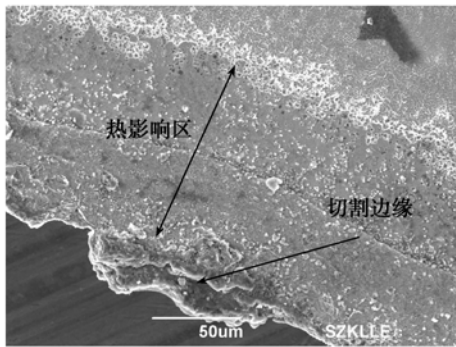


图 3 激光功率对数与烧蚀直径平方关系曲线图

Fig. 3 Relation curve between laser power and square of ablation diameter

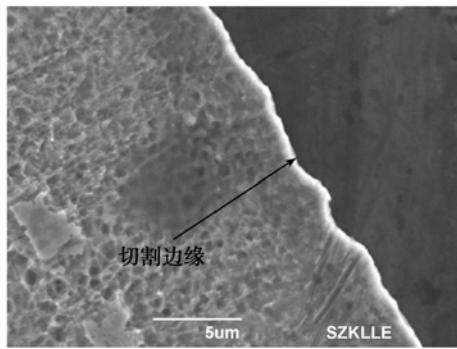
3.2 切割边缘的金相观测

通过普通的 YAG 激光器和飞秒激光切割不锈钢箔的 SEM 图可以知道(如图 4(a)、(b)所示),YAG 激光器切割的钢箔边缘有明显的热影响区,其热影响区的宽度约为 $150 \mu\text{m}$,并且热影响区内有长条状的颗粒析出,边缘形状极不规则;而飞秒激光切割的钢箔边缘几乎看不到热影响区,其边缘形状较规则。通过对飞秒激光切割后不锈钢箔的金相观测可以发现(如图 4(c)所示),钢箔远离切割边缘部分的金相组织为长条状的奥氏体(纤维组织),组织排列较为规律,晶体的厚度约为 $0.5 \mu\text{m}$;切割边缘的金相组织没有变化,仍为纤维状的奥氏体组织,并且金相组织的大小也没有发生变化。这说明激光功率在高于 0Cr18Ni9 烧蚀阈值的情况下,飞秒激光烧蚀钢箔所产生的热量没有使钢箔的金相组织发生变化,这也直接说明了飞秒激光切割钢箔的热影响区极小,并且飞秒激光微加工不锈钢试件在充分保证尺寸精度的基础上还有效地保持了材料原有的特性。对于上述实验现象,分析认为:飞秒激光与钢箔相互作用时,主要通过光子、电子、原子以及晶格之间的热传递完成钢箔的烧蚀,而这种“冷”烧蚀方式使其在烧蚀过程中所产生的热量极小,因此飞秒激光烧蚀的热影响区很小,从而对钢箔的金相组织不会产生影响。



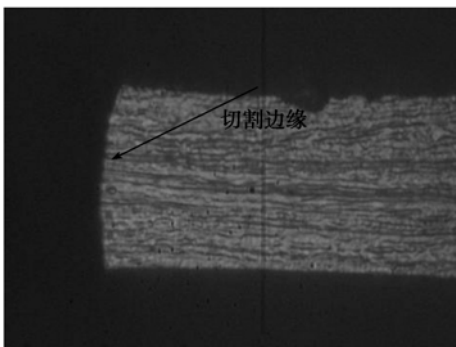
(a) 钢箔被 110 W YAG 激光器切割后的 SEM 图

(a) SEM image of steel film cut by 110 W YAG laser



(b) 钢箔被 500 mW 飞秒激光器切割后的 SEM 图

(b) SEM image of steel film ablated by 500 mW femtosecond laser



(c) 钢箔被 500 mW 飞秒激光切割后的金相组织 (1 000×)

(c) Phase of steel film ablated by 500 mW femtosecond laser (1 000×)

图 4 激光切割后不锈钢箔的微观组织观察

Fig. 4 Microstructures of stainless steel films ablated by lasers

为充分地检测飞秒激光对不锈钢箔材料性能的影响,对不同功率激光切割的不锈钢箔进行了电阻率的检测,实验结果如表 1 所示。检测结果发现,随着激光功率的增加,不锈钢箔的电阻率逐渐的减小。对于上述实验结果,分析认为:飞秒激光切割过程中产生的热量导致了钢箔材料中空位的运动,从而使空位移至钢箔的表面、晶界处并与间隙原子相互作用,其结果导致了空位的消失和空位密度大大减小,由于材料的电阻率对空位比较敏感,因此钢箔的电阻率会随着空位密度的变化而变化^[16]。随着飞秒激光功率的增加,激光切割不锈钢箔的过程中所产生的热量增加,从而使钢箔空位的运动更加剧烈,因此钢箔的空位密度会随着激光功率的增加而减小,而钢箔的电阻率会随着激光功率的增加而减小。电阻率发生变化是材料处于低温回复阶段的典型特征,在回复阶段材料的金相组织不会产生变化。通过上述分析可以知道,飞秒激光切割不锈钢箔的过程中所产生的热量使钢箔边缘部分处于低温回复,并且通过钢箔的回复阶段特性推断该区域的温度在 90℃ 左右,这也与文献[2]中通过红外热像技术直接测得的烧蚀区域温度相近(82.2℃)。因此,试件切割边缘的金相组织不会产生变化,而试件的电阻率会有变化。

表 1 飞秒激光烧蚀后钢箔电阻率的测定

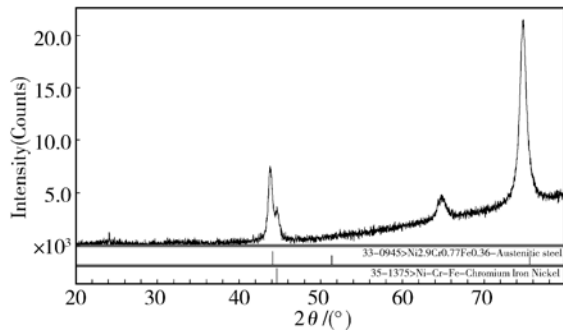
Tab. 1 Electrical resistivity of stainless steel films ablated by femtosecond laser

激光功率 /mW	电压 /V	电流 /mA	电阻 /Ω	电阻率 / $10^{-5} \Omega \cdot \text{mm}$
500	10	198	0.505 051	1.01
450	10	196	1.020 408	2.04
400	10	195	1.282 051	2.56
350	10	195	1.282 051	2.56
300	10	194	1.546 392	3.09
250	10	194	1.546 392	3.09
200	10	193	1.813 472	3.63

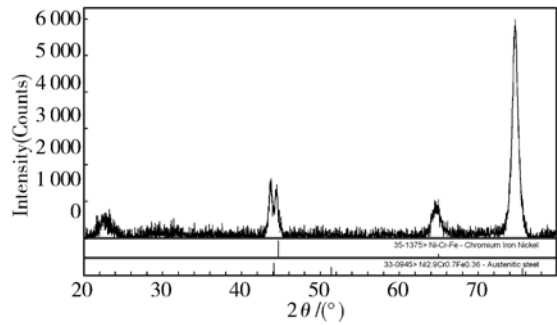
3.3 飞秒激光切割后不锈钢箔的 XRD 检测

为充分考察飞秒激光切割对不锈钢箔材料特性的影响,对切割试件做 XRD 分析。如图 5(a) 所示,对不做任何处理的 0Cr18Ni9 不锈钢箔进行 XRD 测试并通过与标准数据库的 PDF 电子文件对比可以知道,该材料主要物相为: $\text{Ni}_{2.9}\text{Cr}_{0.7}\text{Fe}_{0.36}$ 奥氏体和 Ni-Cr-Fe 合金;被功率为 500 mW

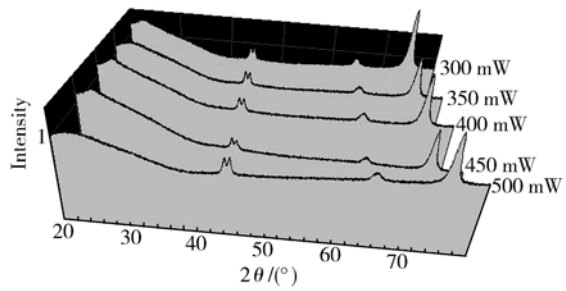
的飞秒激光切割后试件的主要物相没有发生变化(如图 4(b)所示),仍为 $Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36}$ 奥氏体和



(a)原材料的 XRD 测试
(a)XRD test of raw material



(b)试件被功率为 500 mW 的飞秒激光切割后的 XRD
(b)XRD test of stainless steel films ablated by 500 mW femtosecond laser



(c)不同功率的飞秒激光切割钢箔的 XRD 分析
(c)XRD test of films ablated by different femtosecond laser power

图 5 钢箔的 XRD 分析
Fig. 5 XRD test of stainless steel films

Ni-Cr-Fe 合金。对被功率分别为 500, 450, 400, 350, 300 mW 的飞秒激光切割后的试件做 XRD 分析(如图 5(c)所示),可以知道 X 光衍射峰值的位置没有发生变化,因此推断飞秒激光切割后钢箔的主要物相没有变化。这也说明了飞秒激光切割钢箔的过程中所产生的热量没有使钢箔的主要物相产生变化,而使试件处于低温回复阶段。

根据每个物相的 X 光衍射强度并利用式(3)计算出物相的相对含量。其中, I 为物相的 X 光衍射强度; W 为物相的相对含量; RIR 值为参比强度比,可以通过查寻 PDF 卡片获得,其中 $RIR_{Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36}} = 8.89$, $RIR_{Ni-Cr-Fe} = 0.4$ 。上述参数物相含量的计算结果如表 2 所示。

$$\begin{cases} K_{Ni-Cr-Fe}^{Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36}} = \frac{RIR_{Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36}}}{RIR_{Ni-Cr-Fe}} \\ W_{Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36}} = \frac{I_{Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36}}}{I_{Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36}} + I_{Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36}} / K_{Ni-Cr-Fe}^{Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36}}} \\ W_{Ni-Cr-Fe} = \frac{I_{Ni-Cr-Fe}}{I_{Ni-Cr-Fe} + K_{Ni-Cr-Fe}^{Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36}} \cdot I_{Ni-Cr-Fe}} \end{cases} \quad (3)$$

表 2 物相含量的计算结果

Tab. 2 Contents of phase of stainless steel films

功率 /mW	$Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36}$ 衍射光强/cd	Ni-Cr-Fe 合金衍射光强/cd	$Ni_{2.9}Cr_{0.7}Fe_{0.36}$ 奥氏体含量/(%)	Ni-Cr-Fe 合金含量/(%)
0	17 458	2 266	99.42	0.58
300	29 030	16 714	95.69	4.31
350	23 137	15 570	95.69	4.31
400	24 432	15 270	95.69	4.31
450	18 825	12 777	95.69	4.31
500	25 585	116 911	95.69	4.31

通过表 2 的数据可以知道,与原材料相比,被飞秒激光切割后钢箔的物相组成没有发生变化但是其物相的含量发生了变化: $\text{Ni}_{2.9}\text{Cr}_{0.7}\text{Fe}_{0.36}$ 奥氏体由切割前的 99.42% 变为切割后的 95.69%, Ni-Cr-Fe 合金由切割前的 0.58% 变为切割后的 4.31%。对功率分别为 500, 450, 400, 350, 300 mW 的飞秒激光切割的不锈钢试样进行 XRD 分析并计算其物相的相对含量发现:被飞秒激光切割后不锈钢箔物相组成没有发生变化并且物相的相对含量不随飞秒激光功率的变化而变化。综上所述可知:在飞秒激光与材料相互作用时,光子与材料电子的相互作用会导致热电子的发射^[17],而热电子发射会导致材料内部化学键的断裂,从而会影响到物相的相对含量。由于飞秒激光对钢箔的烧蚀是在热影响区很小的范围内完成的,因此热电子的发射仅仅局限于这个很小的范围内,所以导致了物相的相对含量几乎不会受到激光功率的影响。

参考文献:

- [1] LAM Y C, TRAN D V, ZHENG H Y. A study of substrate temperature distribution during ultra-short laser ablation of bulk copper [J]. *Laser and Particle Beam*, 2007, 25:155-159.
- [2] TRAN D V, LAM Y C, ZHENG H Y, *et al.*. Direct observation of the temperature field during ablation of materials by multiple femtosecond laser pulse [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253: 7290-7294.
- [3] TRAN D V, LAM Y C, WONG B S, *et al.*. Quantification of thermal energy deposited in silicon by multiple femtosecond laser pulses [J]. *Optic Express*, 2006, 14(20):9261-9268.
- [4] ZHENG H Y, JIANG Z W. Femtosecond laser micromachining of silicon with an external electric field [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20:1-4.
- [5] BOROWIEC A, HAUGEN H K. Femtosecond laser micromachining of grooves in indium phosphide [J]. *Appl. Phys. A*, 2004, 79:521-529.
- [6] BOROWIEC A, COUILLARD M, BOTTON G A

4 结 论

实验研究了飞秒激光烧蚀不锈钢箔厚度为 20 μm 的 0Cr18Ni9 的特性与相关现象,其结论如下:

(1)在脉宽为 200 fs,中心波长为 800 nm,脉冲重复频率为 250 kHz 的飞秒激光下,厚度为 20 μm 的 0Cr18Ni9 不锈钢箔的单脉冲烧蚀阈值为 0.455 J/cm^2 ,飞秒激光的束腰半径为 10.416 μm 。

(2)通过对飞秒激光切割后的试件的金相观察和电阻率测定发现,飞秒激光切割钢箔所产生的热量使切割边缘处于低温回复阶段。并由此推断飞秒激光烧蚀使切割边缘的温度达到了 90 $^{\circ}\text{C}$ 左右,与文献[2]中通过红外热像技术直接测量得到的烧蚀区温度 82.2 $^{\circ}\text{C}$ 相近。

(3)通过对飞秒激光切割后试件的 XRD 测试得到,飞秒激光烧蚀对钢箔的物相组成没有影响,但对物相的相对含量有影响。在高于烧蚀阈值并对材料产生烧蚀的情况下,钢箔物相的相对含量不随激光功率的变化而变化。

et al.. Sub-surface damage in indium phosphide caused by micromachining of grooves with femtosecond and nanosecond laser pulses [J]. *Appl. Phys. A*, 2004, 79:1887-1890.

- [7] TRTICA M S, GAKOVIC B M, RADAK B B, *et al.*. Material surface modification by ns, ps and fs laser pulses [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2):221-226.

- [8] 龚小竞,褚家如,王翔,等.飞秒激光多次聚焦在并行加工中的应用[J].*光学精密工程*,2008,16(1):48-54.

GONG X J, CHU J R, WANG X, *et al.*. Application of femtosecond laser multi-focusing to parallel fabrication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 48-54. (in Chinese)

- [9] 黄文浩,朱兰芳,陈宇航,等.基于原子力显微镜的 PMMA 飞秒激光纳米加工[J].*光学精密工程*, 2007,15(12):1959-1962.

HUANG W H, ZHU L F, CHEN Y H, *et al.*. AFM based femtosecond laser nanofabrication of PMMA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12): 1959-1962. (in Chinese)

- [10] 赵清亮,姜涛,董志伟,等.飞秒激光加工 SiC 的烧

- 蚀阈值及材料去除机理[J]. 机械工程学报, 2010, 16(21):172-177.
- ZHAO Q L, JIANG T, DONG Z W, *et al.*. Ablation threshold and material removal mechanisms of SiC processed by femtosecond laser [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 16(21):172-177. (in Chinese)
- [11] 袁冬青,周明,蔡兰,等. 飞秒激光微加工 Au 膜 [J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(5):1209-1212.
- YUAN D Q, ZHOU M, CAI L, *et al.*. Micromachining of Au films by femtosecond laser [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(5):1209-1212. (in Chinese)
- [12] 王新林,戴能利,李玉华,等. 金属玻璃飞秒激光烧蚀特性[J]. 中国激光, 2007, 34(9):1297-1302.
- WANG X L, DAI NENG L, LI Y H, *et al.*. Ablation of metallic glasses by femtosecond laser pulses [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2007, 34(9):1297-1302. (in Chinese)
- [13] BIN X, WU X Y, FENG L, *et al.*. Research on the forming mechanism of micro-moulds based on laminated slip-welding of ultra stainless steel foils [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 314-316:1818-1822.
- [14] PECHOLT B, VENDAN M, DONG Y Y, *et al.*. Ultrafast laser micromachining of 3C-SiC thin films for MEMS device fabrication [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2008, 39:239-250.
- [15] DONG Y, MOLIAN P. Femtosecond pulsed laser ablation of 3C-SiC thin film on silicon [J]. *Appl. Phys. A*, 2003, 77:839-846.
- [16] 崔忠圻,谭耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- CUI ZH Q, TAN Y CH. *Metallography and Heat Treatment* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
- [17] 陈安民,高勋,姜远飞,等. 数值模拟飞秒激光加热金属的热电子发射[J]. 物理学报, 2010, 59(10):7198-7201.
- CHEN A M, GAO X, JIANG Y F, *et al.*. Numerical simulation of femtosecond laser heating of metal films using electron thermal emission [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(10):7198-7201. (in Chinese)

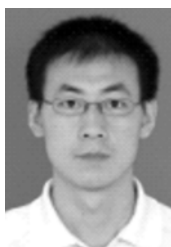
作者简介:



徐 斌(1985—),男,山东临沂人,博士研究生,研究方向为超快激光技术。E-mail: xubin_szu@163.com



罗 烽(1962—),男,副教授,1991年于浙江大学获得硕士学位,主要从事光学精密制造,精密测量方面的研究。E-mail: LLF@szu.edu.cn



杜晨林(1976—),男,教授,2003年于山东大学晶体材料国家重点实验室获理学博士学位,中国光学学会高级会员,主要从事新型激光晶体、非线性光学晶体及其激光和频率变换器件的研究。E-mail: cldu@szu.edu.cn



孙秀泉(1952—),男,教授,博士生导师,1994年于西北大学获得博士学位,主要从事光核反应理论研究与量子光学理论研究。E-mail: sunxq@szu.edu.cn

通讯作者:



伍晓宇(1963—),男,四川仁寿县人,教授,研究方向为激光快速成形、微成形与微模具。E-mail: wuxy@szu.edu.cn