

文章编号: 1001-3806(2005)03-0304-04

## 飞秒激光加工过程中光学参数对加工的影响

于海娟<sup>1</sup>, 李 港<sup>1\*</sup>, 陈 椽<sup>1</sup>, 张丙元<sup>1,2</sup>

(1. 北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100022; 2 聊城大学 物理科学与信息工程学院, 聊城 252059)

摘要: 分析了国际上飞秒激光同材料相互作用的实验研究, 介绍了飞秒激光加工过程中, 各个光参数对加工质量和加工尺寸的影响, 针对光参数在飞秒激光加工过程中产生的影响做出了分析。

关键词: 飞秒激光; 微加工; 光参数影响; 烧蚀阈值

中图分类号: TG 665 文献标识码: A

### Effect of femtosecond laser parameters on micromachining process

YU Haijuan<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1</sup>, CHEN Meng<sup>1</sup>, ZHANG Bingyuan<sup>1,2</sup>

(1. College of Laser Engineering Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. College of Physics Science and Information Engineering Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

**Abstract** The research of material processing with femtosecond laser has been performed in many countries. The development of many kinds of material processing with femtosecond laser in the world is introduced and the optical parameters' effect on the micromachining process is analyzed.

**Key words** femtosecond laser; micromachining; optical parameters; effect; ablation; threshold

### 引 言

20 世纪 60 年代, 激光的发明, 使得激光材料加工成为一个非常重要的研究领域。在重工业领域, CO<sub>2</sub> YAG 激光器被广泛地应用于切割、焊接、熔覆、打孔等行业。在微型加工工业领域, 发展比较完善的准分子激光器、铜蒸气激光器应用于多种材料的微光刻和微成型。目前, 飞秒激光微加工以其更高的加工精度和更小的加工尺寸为激光加工业开拓了更为广阔的应用领域。

飞秒激光同材料的作用机理区别于传统的激光材料加工, 是一个多光子吸收的过程, 非线性作用过程占主导地位, 因此具有不可比拟的优点: (1) 大大降低了材料的烧蚀阈值。瞬时能量的注入, 使得能量瞬间沉积在固体物质的趋肤层内, 将固体材料直接汽化, 材料的烧蚀阈值同材料自身的熔点无关<sup>[1]</sup>; (2) 实现了真正意义上的冷加工。飞秒激光的作用时间短, 使得能量以等离子体的形式被迅速带走, 热量来不及在材料内部扩散, 是一个真正意义上的冷加工过程; (3) 无等离子体屏蔽效应。在等离子体产生并且膨胀吸收能量

之前, 激光照射就终止了, 避开了等离子体屏蔽效应, 提高了能量的利用率; (4) 无热影响区 (HAZ)。激光脉冲同材料的作用时间在飞秒量级, 热量来不及传播, 可视做无热影响区; (5) 无材料损伤。在整个加工过程中, 材料的去除方式以蒸发和汽化的形式进行, 无熔融相, 因此也没有再铸层和微裂纹的形成; (6) 无飞溅物存在。由于瞬时汽化, 材料以气体形式瞬间蒸发, 材料表面没有任何飞溅物, 大大提高了加工材料表面的光洁度。

飞秒激光加工具有其它激光加工方式不可替代的优越性, 越来越多地吸引了人们的注意力, 美国、俄罗斯、日本、德国、加拿大、英国、法国、新加坡等国家的实验室都在大力开展用飞秒激光加工各种材料的实验<sup>[2]</sup>, 并且将飞秒激光逐步应用到各个领域。

飞秒激光加工过程中, 各个光参数对加工质量和加工尺寸有很大的影响, 又因其独特的作用机理, 使这些光参数对加工的影响和传统的激光加工有所不同, 以下分别论述飞秒激光各个光学参数对加工的影响。

### 1 飞秒激光光参数对加工的影响

#### 1.1 脉冲宽度的影响

脉冲宽度直接影响材料的烧蚀阈值, 对于同种材料, 脉冲宽度越窄, 越容易达到烧蚀阈值, 达到烧蚀阈值时所需要的单脉冲的能量越小。在医学领域, 脉宽越窄, 越容易用小能量的激光脉冲完成同机体的作用,

基金项目: 北京市自然科学基金重点资助项目 (3021001)

作者简介: 于海娟 (1977-), 女, 博士研究生, 主要从事激光加工方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: lig@bjut.edu.cn

收稿日期: 2004-04-30 收到修改稿日期: 2004-06-21

减小了对周围机体的损伤。

飞秒激光脉冲使得材料的烧蚀阈值有更为具体的数值,在长脉冲加工时,在偏离烧蚀阈值的大范围区域也会有烧蚀现象的发生,见图 1a,而飞秒激光脉冲,烧蚀现象只会在烧蚀阈值附近发生<sup>[3]</sup>,如图 1b所示。

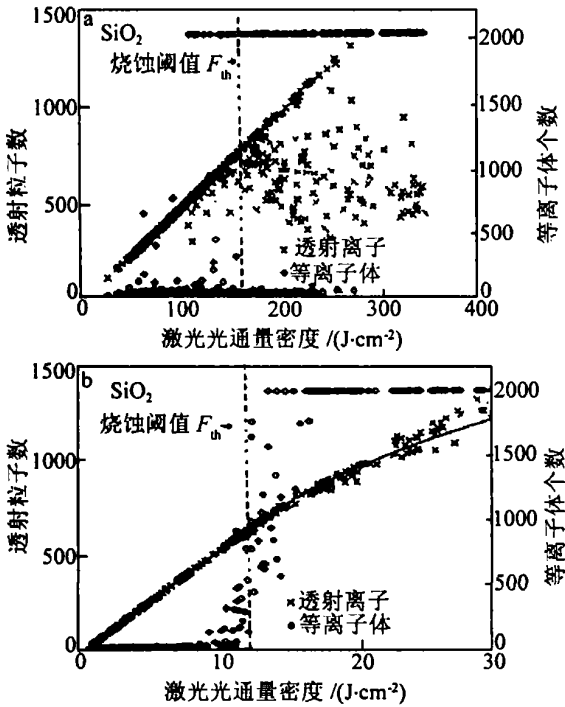


图 1 不同脉冲宽度激光加工硅材料 a-7ns b-170fs

图 1a 中脉冲宽度为 7ns,在烧蚀阈线的两侧都有大量等离子体存在(产生烧蚀时,表现为大量等离子体的溢出),烧蚀阈值不是精确数值。图 1b 中,烧蚀点积聚在烧蚀阈值线附近,在横坐标 10J/cm<sup>2</sup>左右处产生烧蚀,烧蚀阈值有具体的数值。

利用长脉冲(脉冲宽度大于 10ps)进行材料加工时,烧蚀阈值同脉冲宽度的关系遵循  $F_{th} \propto \tau_p^{1/2}$  的规律;用短于 10ps 的超短脉冲加工时,烧蚀阈值同脉冲宽度的关系会偏离  $F_{th} \propto \tau_p^{1/2}$  法则。如图 2 所示<sup>[4]</sup>,针

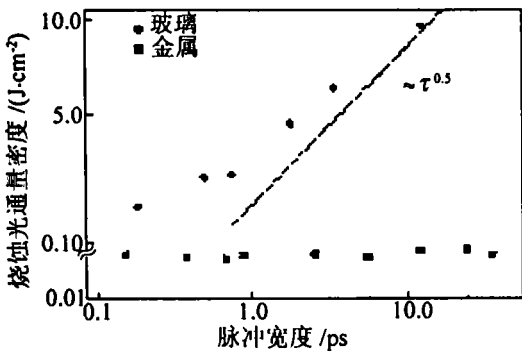


图 2 玻璃和金属材料烧蚀阈值随脉冲宽度的变化

对不同材料,脉冲宽度和烧蚀阈值的关系又有差别。在金属加工实验中,脉冲宽度越窄,烧蚀阈值受脉冲宽度的影响越小,最后趋近于一个定值<sup>[5]</sup>。脉冲宽度越窄,加工过程中光学穿透深度,即吸收深度要大于热穿

透深度,而吸收深度主要取决于材料的吸收系数,同材料自身的性质有关。因此,对于同一种金属材料,脉冲宽度小于一定数值时,其烧蚀阈值不再随着脉冲宽度的变化而变化。而非金属材料加工过程中,在脉冲宽度变窄时,烧蚀阈值随着脉冲宽度变窄而变小,斜率要小于  $F_{th} - \tau_p^{1/2}$ <sup>[5]</sup>,其烧蚀阈值受脉冲宽度的影响变小。如图 2 所示,金属的烧蚀阈值具有在一定的脉冲宽度范围内是个定值,玻璃的烧蚀阈值偏离  $F_{th} - \tau_p^{1/2}$  斜线。

在宏观上,不同脉冲宽度带来的直接影响是加工质量的好坏,脉宽越窄,被加工物体的边缘越清晰,粗糙度越小。在金属加工过程中,由于长脉冲照射能量扩散到很大区域,在照射区外侧产生了熔融相,熔融相粘性大,容易在小孔周围和表面产生再铸层,脉冲宽度窄,无再铸层,因熔融相存在而冷却后产生的裂纹也由于脉冲宽度的变窄而消除。

总之,飞秒激光加工过程中,脉冲宽度越窄烧蚀阈值越低,并且会偏离长脉冲的  $F_{th} - \tau_p^{1/2}$  法则,金属材料有更为确定的烧蚀阈值,非金属材料的烧蚀阈值受脉冲宽度影响也变小。脉冲宽度越窄,加工精度越高。

### 1.2 激光波长的影响

传统激光加工过程中线性吸收占主导地位,加工主要是利用材料对不同波长激光的热吸收将材料熔化完成加工过程。由于材料表面对不同波长激光的反射率、透射率、散射率以及材料对某波长激光的吸收系数不同,激光波长会直接影响到加工质量的好坏甚至加工过程能否进行。透明材料在其吸收禁带内很难加工。

飞秒激光是非线性吸收和线性吸收结合的加工过程,其中非线性吸收过程占主导地位,能量迅速注入是多光子吸收过程,受材料表面的反射率、散射率影响很小。所以,飞秒激光加工可以避免上述缺点,减少了对波长的依赖性。即使是在吸收禁带内,也可以实现对透明材料的微细加工,这已经被大量实验验证<sup>[6,7]</sup>,如 2002 年美国哈佛大学,用三倍频的钛宝石飞秒激光对玻璃进行加工,成功加工实现了玻璃波导<sup>[8]</sup>。见图 3,

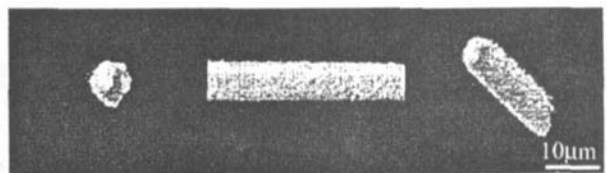


图 3 飞秒激光加工玻璃波导

然而,由于线性吸收过程仍旧存在,加工质量会在一定程度上受到波长的影响。尤其是热导率很高的金属材料,例如,在对金属 (Al, Cu) 加工过程中,波长越短,线性吸收系数越大,尤其是对紫外 (UV) 波长要比可见光和红外区域线性吸收系数大,并且对紫外波长散射弱,所以,用波长更短的飞秒激光越容易得到小尺

寸的加工,并且提高了加工精度和加工边缘的清晰度。为了验证波长在飞秒激光加工中的影响,有人用三倍频的钛宝石激光(250nm)对Cu和Al进行微细加工<sup>[1]</sup>,并同长波长在750nm的加工结果进行比较,证明波长越短,加工精度越高。比较发现,随着波长的变化,加工尺寸并没有明显的变化。因此,为了提高飞秒激光的加工精度,可以选择短波长的飞秒激光器,对材料进行加工。

除此之外,激光波长还会对材料烧蚀阈值有一定的影响,波长越短,材料烧蚀阈值越低;反之波长越长,材料烧蚀阈值越高。

### 1.3 光通量密度的影响

飞秒激光加工过程中,同样波长和脉宽的光脉冲入射,光脉冲个数一定时,光通量密度直接影响到材料加工的深度和宽度。

1.3.1 光通量密度对加工深度的影响 金属材料的加工深度取决于光学穿透深度 $\delta$ 和热穿透深度 $l$ 小的光通量密度进行飞秒激光加工,光学穿透深度大于热穿透深度,即 $\delta > l$ 此时的加工深度用下式表示<sup>[9]</sup>:

$$L \approx \delta \ln(F_a / F_{th}^\delta) \quad (\delta > l) \quad (1)$$

如果光通量密度变大,超过一定数值,热穿透深度要大于光学穿透深度,即 $(\delta < l)$ ,此时的加工深度用下式表示<sup>[9]</sup>:

$$L \approx l \ln(F_a / F_{th}^l) \quad (\delta < l) \quad (2)$$

式中, $F_a$ 是入射光的光通量密度, $F_{th}^\delta = \rho \Omega \delta F_{th}^l$ 和 $F_{th}^l$ 是两种情况下的烧蚀阈值。 $\delta = 1/\alpha$ 是光穿透深度, $\alpha$ 是材料的吸收系数; $l = (D/\rho C)^{1/2}$ 是热扩散长度, $D$ 是金属材料的热传导系数,同材料本身的特性有关。 $\rho$ 是金属密度, $\Omega$ 是单位体积物质汽化能量。上述两种情况下,光通量密度同加工深度之间的关系见图4。图4中,用飞秒激光对Cu加工,光通量密度小于500mJ/cm<sup>2</sup>时,遵循(1)式的规律。大于500mJ/cm<sup>2</sup>时,遵循(2)式的规律。

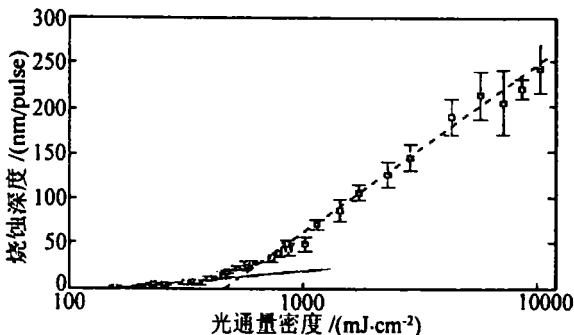


图4 铜的烧蚀中烧蚀深度随光通量密度的变化关系  
— $\delta > l$  ..... — $\delta < l$

此外,光通量密度影响加工精度<sup>[10]</sup>。故用脉宽窄,光通量密度小的飞秒激光更易实现高精度加工。如图5所示,随着光通量密度不断变大,表面光洁度变小。

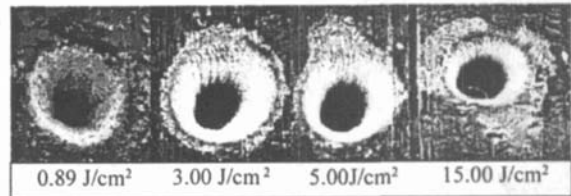


图5 真空中用光通量密度不同的120fs钛宝石激光在注入光脉冲个数为2000时,对50µm厚的SS薄片加工结果比较

而对于非金属材料,如半导体、导电体材料,以及透明材料,通常情况下,光学穿透深度大于热穿透深度,主要遵循(1)式的规律,其加工深度直接由光学穿透深度来决定。

M IYAMOTO等<sup>[11]</sup>针对不同种类的材料,导体(Cu,Al)、半导体S和绝缘体PMMA,silica和glass在加工过程中加工精度与光通量密度的关系进行了详细的分析比较,验证了上面的结论<sup>[1]</sup>。

1.3.2 光通量密度对加工孔径的影响 注入脉冲个数一定时,小孔直径同光参数的关系如下式所示<sup>[12]</sup>:

$$D = 2w_0 \sqrt{\ln(F_0 / F_{th})} \quad (3)$$

式中, $D$ 为加工孔径, $F_{th}$ 材料表面损伤阈值, $F_0$ 是入射光脉冲光通量密度, $w_0$ 是入射光光斑直径。如果飞秒激光其它参数确定,加工孔径则直接由光通量密度来决定,见图5光通量密度变大时,孔径也随之变大。

### 1.4 注入光脉冲个数的影响

飞秒激光加工过程中,入射光脉冲的个数会产生3个方面的影响:加工深度、加工孔径和烧蚀阈值。

1.4.1 烧蚀孔径和光脉冲个数之间的关系 加工孔径在一定范围内随着光脉冲个数的增加而增大,注入光脉冲个数到达一定数值时,脉冲个数增加,加工孔径不再随之变化,见图6。

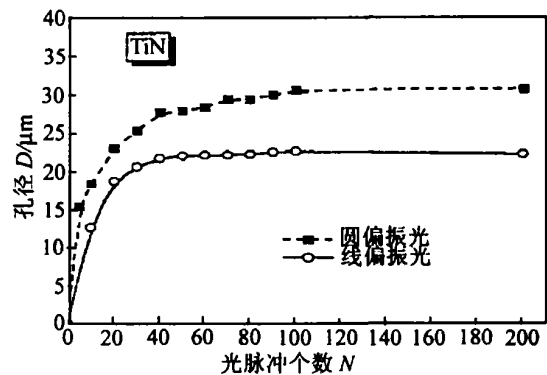


图6 不同偏振态下加工直径同注入光脉冲个数之间的关系

1.4.2 加工深度同注入光脉冲个数之间的关系 加工深度和光脉冲个数的关系用下式表示:

$$h = d(N - N_0) \quad (4)$$

式中, $d$ 是烧蚀速率。 $N_0$ 是达到烧蚀阈值时注入光脉冲个数。加工深度和入射光脉冲个数成线性关系。在其它参数完全相同的情况下,脉冲个数越多,打孔越深,如图7所示。

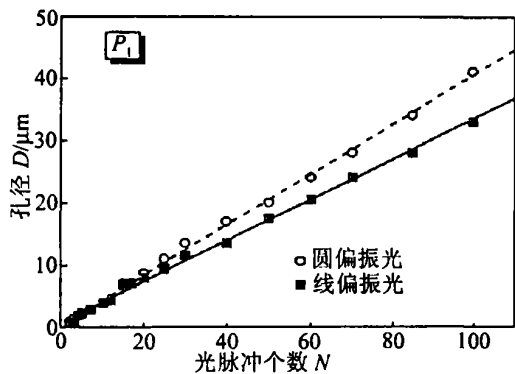


图 7 不同的偏振情况下入射光脉冲个数同加工深度之间的关系

1.4.3 光脉冲个数和烧蚀阈值的关系 光斑大小相同,光脉冲个数越多,其烧蚀阈值越低<sup>[12]</sup>。如图 8 所示。

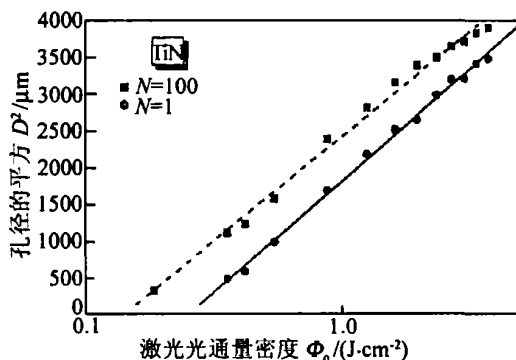


图 8 加工的孔径依赖于光通量密度和入射光脉冲个数

注入光脉冲个数增加时,能量更为集中,越容易达到材料的烧蚀阈值。图 8 中,两条斜线的光脉冲个数分别为 1 和 100 从横坐标可以看出,光脉冲个数为 100 时的烧蚀阈值要小于光脉冲个数为 1 时的烧蚀阈值。

### 1.5 重复频率的影响

飞秒激光的脉冲重复频率对加工速率有直接影响,高重复频率激光有利于提高加工速度,飞秒激光加工机要想实现高速率加工,可以通过提高光脉冲的重复频率来实现。但是,在激光功率一定的情况下,高的重复频率会降低单脉冲能量。所以,高重复频率激光脉冲适于加工硬性不大深度要求不高的器件,如对木头的加工<sup>[13]</sup>。

如果是对硬性很高的材料进行加工,可以通过降低重复频率,提高脉冲能量的方法完成,相应的加工速率会降低。

### 1.6 其它光学参数的影响

在飞秒激光加工过程中光的偏振度也会带来一定影响,其它参数完全相同时,线偏光加工孔径小于全偏光加工孔径,线偏光的加工深度比全偏光深(见图 6)。

此外,单脉冲能量会直接影响烧蚀阈值的大小,脉冲宽度相同,单脉冲能量越大,越容易达到烧蚀阈值,烧蚀深度越深。

所以,飞秒激光加工,针对不同加工材料和对不同

加工精度要求,选取合适的激光参数,可以得到合理的加工尺寸,理想的加工质量。

## 2 总 结

总之,飞秒激光加工作为一种新型、高效、精细的微型加工工具,已经得到了越来越广泛的认识和应用。目前,由于半导体激光器的商业化,尤其是波长在 900nm~980nm 的半导体激光器,为发射带宽比较宽、容易产生飞秒量级脉冲的掺 Yb 晶体提供了抽运源,这种飞秒激光器减少了能量的转换环节,提高了能量的利用率。现在,设计一套价格便宜、结构紧凑、可调节的飞秒激光加工系统已经不是一件很困难的事情。这种低价、高效的飞秒激光器进行激光加工会逐渐应用到工业加工领域。飞秒激光加工也将会成为微加工领域的主导力量。

### 参 考 文 献

- [1] LI C, ARGUMENT M, TSUJY Y. Micromachining with femtosecond 250nm laser pulses [J]. Proc SPIE, 2000, 4087: 1194~1200
- [2] CHICHKOV B N, MOMMA C, NOLTE S. Femtosecond picosecond and nanosecond laser ablation of solids [J]. Appl Phys 1996, A 63: 109~115.
- [3] LU X, DU D, MUROU G *et al*. Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(10): 1706~1715
- [4] PARSONS-KARAVASSILIS D, JONES R, COLE M J *et al*. Diode pumped all solid state ultrafast Cr:LSGAF laser oscillator amplifier system applied to laser ablation [J]. Opt Commun 2000, 175: 389~396
- [5] PRONKO P P, DUTTA S K, SUIER J M. Machining of sub-micron holes using a femtosecond laser at 800 nm [J]. Opt Commun 1995, 114: 106~110.
- [6] SHAH L, TAWNY J R, CHARDONSON M *et al*. Photonic device fabrication in glass by use of nonlinear materials proceeding with a femtosecond laser oscillator [J]. Opt Lett 2001, 26: 1516
- [7] ZOU BR A, SHAH L, RICHARDSON K. Technology developments towards the practical use of femtosecond laser micromaterials proceeding [J]. Proc SPIE, 2002, 4760: 406~414.
- [8] SCHAFFER C B, MAZUR E, SQUIER J A *et al*. Micromachining and material change characterization using femtosecond laser oscillators [J]. Proc SPIE, 2002, 4633: 112~118
- [9] MOMMA C, CHICHKOV B N, NOLTE S *et al*. Short-pulse laser ablation of solid targets [J]. Opt Commun 1996, 129: 134~142
- [10] MEUNIER M, FISETTE B, HOULEA *et al*. Processing of metals and semiconductors by a femtosecond laser based microfabrication system [J]. SPIE USE, 2003, 6: 4932~4978.
- [11] MIYAMOTO I, LIU Y F, SUGIOKA K *et al*. Morphological characterization of various kinds of materials in femtosecond laser micromachining second international symposium on laser precision microfabrication [J]. Proc SPIE, 2002, 4426: 86~89
- [12] BONSE J, BOUDACH S, KRUGER J *et al*. Femtosecond laser micromachining of technical materials [J]. Proc SPIE, 2000, 4064: 161~172
- [13] BAUBEAU E, LEHARICR, JONIN C *et al*. Micromachining with high repetition femtosecond laser sources [J]. Proc SPIE, 2000, 4088: 48~50