

doi: 10.3788/lop47.051403

# 铝箔微孔的飞秒激光加工工艺的研究

汪 刚<sup>1</sup> 杨洗陈<sup>2</sup> 梁 铭<sup>1</sup> 傅宁霞<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>广东纺织职业技术学院, 广东 佛山 528041; <sup>2</sup>天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

**摘要** 在飞秒激光与金属材料相互作用研究的基础上,在不同的激光器运行参数条件下利用飞秒激光器在金属铝箔上制备阵列微孔,研究了阵列微孔的孔径与激光器工艺参数之间的关系。利用 Origin7.0 及 SPSS13.0 对实验数据进行分析,指明了飞秒激光器脉冲数、脉宽、单脉冲能量对孔径大小的影响。

**关键词** 飞秒激光; 脉冲数; 脉宽; 单脉冲能量

中图分类号 TP1 OCIS 140.3538 140.7090 文献标识码 A

## Femtosecond Laser Processing Microporous in Aluminum Foil

Wang Gang<sup>1</sup> Yang Xichen<sup>2</sup> Liang Ming<sup>1</sup> Fu Ningxia<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Guangdong Institute of Textile Technology, Foshan, Guangdong 528041, China)  
(<sup>2</sup>Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

**Abstract** Based on the study on femtosecond laser interaction with metal materials, with different laser operating parameters, micro-arrays pores are processed on aluminum foil with femtosecond laser. The relationship between the aperture of aluminum foil processing micro-arrays pores and the laser parameter is studied. Origin7.0 and SPSS 13.0 are used to analyse experimental data by graphs. The influences of femtosecond laser pulse number, pulse width, single pulse energy on the aperture sizes are indication.

**Key words** femtosecond laser; pulse count; pulse width; monopulse energy

### 1 引言

激光切割、激光表面处理、激光焊接、激光打孔和工业领域的迫切需求,大大促进了激光加工技术的实用化<sup>[1,2]</sup>。膜工业的发展为激光微加工技术带来了新的挑战。目前,市面上微孔过滤膜多以高分子材料为主,从而限制了膜技术的应用,也提高了其成本。利用飞秒激光与金属材料作用的特性制备金属微孔膜,力求寻找一条新型膜材料之路<sup>[3]</sup>。在现代制造技术的支持下,金属箔越来越薄,而且致密度很高,为探索新的膜材料提供了前提。利用日益发展的激光技术在金属箔上制备微孔已不是难事,将激光技术与膜技术有机结合,探索一种新的膜材料之路<sup>[4]</sup>。超短脉冲激光微加工技术已进入新的时代,利用其制备微孔过滤膜具有重要的研究价值。本文在不同的激光器运行参数条件下利用飞秒激光器在金属铝箔上制备阵列微孔,研究了阵列微孔的孔径和激光器工艺参数之间的关系<sup>[5-7]</sup>。

收稿日期: 2009-08-06; 收到修改稿日期: 2009-11-02

作者简介: 汪 刚(1979—), 男, 硕士研究生, 讲师, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: wg\_2002@126.com

导师简介: 杨洗陈(1941—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光材料相互作用和激光加工理论及应用等方面的研究。  
E-mail: yangxich@126.com

## 2 实验数据分析

### 2.1 正交实验

在不知道激光参数(单脉冲能量、脉宽、脉冲数)对孔径的影响趋势情况下,设计正交实验<sup>[8,9]</sup>采集了大量数据,进行多种处理。以铝箔为材料,通过正交实验找到激光参数与孔径间相互关系。其中指标为孔径,因子单脉冲能量设为  $A$ ,脉宽设为  $B$ ,脉冲数设为  $C$ 。正交实验表选用正交表  $L_{25}(5^6)$ ,按其设计正交实验,并记录结果,计算出极差,如表 1 所示,截取于实验所得结果的直观分析表。

表 1 实验结果  
Table 1 Experimental results

Row	1	2	3	4	5	6	
Level	$A$	$B$	$A \times B$	$C$	$A \times C$	$B \times C$	Result
Extreme difference	9.186	3.190	6.342	5.534	3.706	3.164	

依直观分析得到的数据作因子指标分析,利用统计软件 spss13.0 综合处理数据得效应曲线图,如图 1 所示。其纵坐标表示孔径,脉冲数在一定范围内时,孔径随脉宽、脉冲数、单脉冲能量增加而增大,其中单脉冲能量对孔径影响最大,其次是脉冲数,脉宽影响最小。从直观分析中的极差可以看出,单脉冲能量对孔径影响最大,其次是脉冲数和单脉冲能量与脉宽交互作用对孔径的影响,最后是脉宽和脉宽与脉冲数交互作用对孔径的影响,与图 1 基本吻合。由此推论,3 个因子(单脉冲能量、脉宽、脉冲数)对指标(孔径)影响是在一定范围内的,当因子到达一定程度后,对指标的影响最终趋于饱和,即基本无影响。考虑因子相互间的交互作用时,由极差知交互作用  $A \times B$  最重要,  $B \times C$  最差,  $A \times C$  居中。各因子交互图如图 2 所示,因子交互作用  $B \times C$  对指标(孔径)影响不大,孔径几乎在一直线上下波动[图 2(c)]。综合交互作用图,可以初步得到,单脉冲能量为  $66.64 \mu\text{J}$ ,脉冲数控制在 10 个左右,脉宽控制在 200 fs 左右时,打孔效果最优。为了使各因子及交互作用区别明显,在进行统计分析时,对实验结果进行了归一化处理,使其结果分布在  $[0, 1]$  之间。在此基础上进行方差分析,给定显著水平  $\alpha=5\%$ ,查表  $F_{0.05}(4,4)=6.39$ ,将各因子  $F$  值与之比较,得各因子的显著性,如表 2 所示。

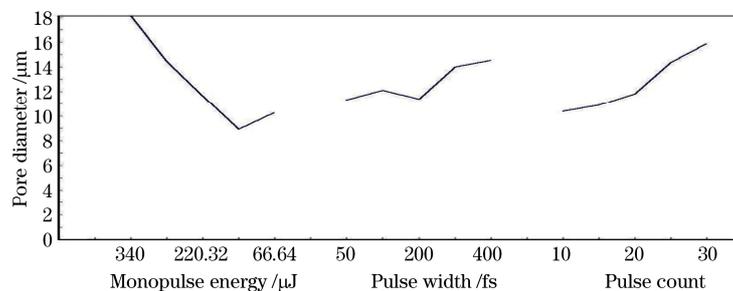


图 1 因子(单脉冲能量、脉宽、脉冲数)指标分析得到的效应曲线图  
Fig.1 Element (monopulse energy, pulse width, pulse count) analysis of the effect of curve

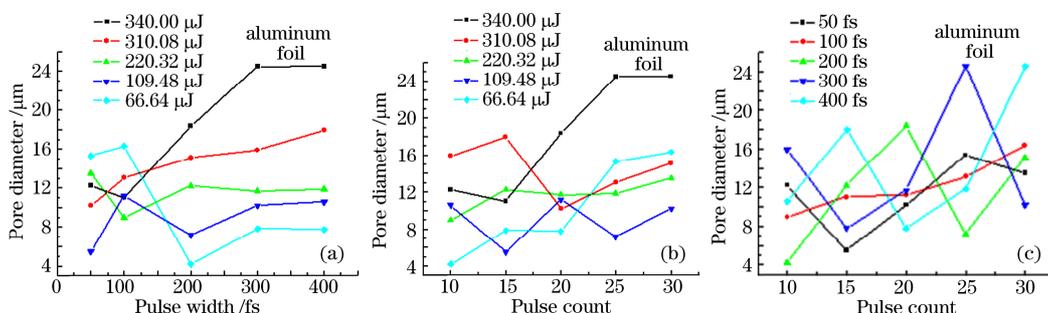


图 2 (a)单脉冲能量与脉宽交互作用图; (b)单脉冲能量与脉冲数交互作用图; (c)脉宽与脉冲数交互作用图  
Fig.2 (a)Monopulse energy and pulse width interaction diagram; (b)monopulse energy and pulse count interaction diagram;

(c) pulse width and pulse count interaction diagram

综上所述,单脉冲能量是最重要的因素,脉宽(在飞秒量级范围)与脉冲数交互作用对孔径影响不大(由双温模型可以得到解释)。而脉冲数、单脉冲能量与脉冲数交互作用、单脉冲能量与脉宽交互作用均

对孔径有显著影响，这主要是因为单脉冲能量对孔径影响程度很大，尤其对于这种薄材质更是如此。

表 2 统计分析表  
Table 2 Statistical table

Source	Dispersion	DOF	Mean square fluctuation	F	Significance
A	0.429	4	0.107	35.75	Significant
B	0.058	4	0.0145	4.833	Insignificant
A×B	0.163	4	0.04075	13.583	Significant
C	0.180	4	0.045	15.0	Significant
A×C	0.089	4	0.02225	7.417	Significant
B×C	0.054	4	0.0135	4.5	Insignificant
Error	0.012	4			
Sum	0.985	24			

## 2.2 计算机拟合实验

为了检验正交实验的结果，将所有数据综合处理，并借助计算机对处理后的数据进行拟合<sup>[8,9]</sup>。实验过程中在不同的脉宽、单脉冲能量、脉冲数情况下进行打孔实验，并用扫描电镜将打的孔放大到 3000 倍并保存其图像，然后对其实验数据进行分析，力求找出满足实验期望目标的激光参数。以下给出实验中所得孔径、脉宽、脉冲数、单脉冲能量间的关系。

1) 分支分析：将数据按不同脉宽分别进行处理，将同一单脉冲能量所对应的脉冲数和孔径分别作算术平均，最后用 Origin pro 7.0 进行分析，结果如图 3，图 4 所示。由图 3 可知单脉冲能量对孔径的影响很显著，它是与材料作用至关重要的激光参数。孔径随脉冲能量的增大而增加的原因是由于过高的功率密度使打孔产生过多的蒸气相物质，加而产生强烈的冲击波，致使高压蒸气带着熔融状物质从孔底高速向外喷射，产生局部的微型爆炸。这一点可以通过打孔过程中功率越高，发出的微型爆炸越大得到证实。

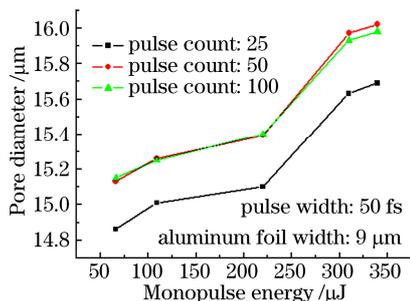


图 3 单脉冲能量和孔径关系曲线

Fig.3 Monopulse energy & pore diameter relation curve

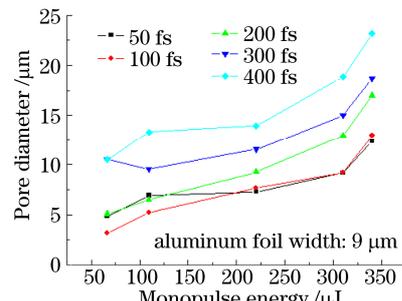


图 4 孔径和单脉冲能量与脉冲数交互作用关系曲线

Fig.4 Monopulse energy & pore diameter and pulse count interaction relation curve

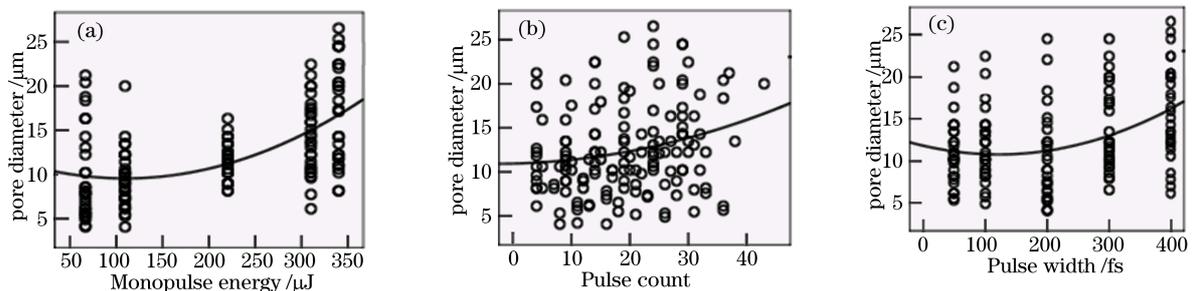


图 5: 单脉冲能量(a), 脉冲数(b), 脉宽(c)与孔径的关系

Fig.5: Monopulse energy (a), pulse count(b) and pulse width(c) versus pore

2) 综合分析：将所有的实验数据进行曲线拟合，用统计软件 SPSS 13.0 进行数据拟合，结果如图 5 所示。从图 5(a)可见，单脉冲能量控制在 100  $\mu\text{J}$  左右时，可以得到较小孔径，但随着单脉冲能量的增大，孔径的增加幅度也随之加剧，但这种增长不是无止境的，与分支分析结果吻合。由图 5(b)可以得到，脉冲数小于 20 时孔径的增长幅度不大，当脉冲数大于 20 时，孔径增长幅度加剧，但最终还是趋于平衡，与分支分析的结论基本吻合。由图 5(c)可以得到，脉宽控制在 100~200 fs 时，将有可能得到较小孔径值，

与分支分析结论相吻合。脉冲数与脉宽(飞秒量级)之间无显著关系,即同一单脉冲能量下,脉冲数随脉宽变化幅度很小。

### 3 实验误差分析

由于实验中不可避免的误差,造成实验数据有些偏离理论值,其影响因素<sup>[8,9]</sup>主要有以下几个方面。1) 材料表面不平整,造成材料被加工面不能始终在焦平面上。这导致在实验中同一种单脉冲能量和脉宽条件下,打透同一平面上的孔所需脉冲数截然不同,加工出来的孔径也分布在较大的范围内。光线在焦平面前后的传播特点决定了材料破坏的不同性质。当聚焦透镜焦点处在材料上表面时,孔壁吸收光能极少,一般只因热传导产生轻微的熔化;当焦点处在材料表面下某一位置时,离焦将使被加工点的能量密度大大下降,导致孔壁产生强烈的熔化。2) 光斑不好,致使孔形貌呈椭圆,周围出现很多白的光环,而且孔周围的融渣多。3) 载物台与出光方向不垂直,即材料表面与出光方向不垂直,则光斑成一定角度投影在材料表面,这时必然使孔形不圆,且加工孔径较大,因为此时在材料表面的投影光斑直径较大。4) 孔径用一般直尺,在扫描电镜下的图片上直接测量读出,难免出现误差。但这种误差相对较小,因为图片本身已放大到 3000 倍,读数时已精确到小数点后三位。

### 4 结 论

综合上述,脉冲数在 20 是一个分界点,脉冲数小于 20,孔径的增长幅度不大;脉冲数大于 20 时,孔径增长幅度加剧,但最终还是趋于平稳。脉宽控制在 100~200 fs,将有可能得到较小孔径值。脉冲数与脉宽(飞秒量级)之间无显著关系,即同一单脉冲能量下,脉冲数随脉宽变化幅度很小,几乎没变化。单脉冲能量控制在 100  $\mu\text{J}$ ,可以得到较小孔径,但随着单脉冲能量的增大,孔径的增加幅度也随之加剧。

### 参 考 文 献

- 1 K. I. Johnson. Current and future developments of plasma, laser and electron beam processing[C]. *Proc. Int. Power Beam Conf., San Diego, California, USA, 1998*, 5(2~4): 1~10
- 2 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. The Physics of Laser Interactions with Materials[M]. Beijing: China Machine Press, 1996, 6~17, 185~194  
陆建,倪晓武,贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]北京:机械工业出版社,1996,6~17,185~194
- 3 Wang Qingyue, Dai Jianming, Xiang Wanghua *et al.*. Femtosecond pulse generation of self-mode-locked Ti:sapphire laser by self-focusing[J]. *Acta Optica Sinica*, 1993, 13(1): 93~94  
王清月,戴建明,向望华等. 掺钛蓝宝石激光器实现飞秒级自聚焦锁模运转[J]. 光学学报, 1993, 13(1): 93~94
- 4 Jia Wei, Wang Qingyue, Fu Xing. Femtosecond laser in material micro processing application[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2004, 21(2): 194~201  
贾威,王清月,傅星. 飞秒激光在材料微加工中的应用[J]. 量子电子学报, 2004, 21(2): 194~201
- 5 Ni Xiaochang. Theoretical and Experimental Studies on Femtosecond Laser Micromachining of Metals[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004  
倪晓昌. 飞秒激光微精细加工理论与实验研究[D]. 天津:天津大学,2004
- 6 Wang Gang. Study on Producing Metal Membrane with Technology of Ultra Short-Pulse Laser Drilling[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2006  
汪刚. 利用超短脉冲激光打孔技术制备金属多孔膜的研究[D]. 天津:天津工业大学,2006
- 7 Pan Kailin, Chen Zichen, Fu Jianzhong. Laser micromachining and its application in the microfabrication of MEMS[J]. *Manufacturing. Technology. Machine Tool*, 2002, (3): 5~7  
潘开林,陈子辰,傅建中. 激光微细加工技术及其在MEMS微制造中的应用[J]. 制造技术与机床, 2002, (3): 5~7
- 8 Liu Peisheng, Liang Kaiming. Preparation methods for porous metal materials[J]. *J. Functional. Materials.*, 2002, (1): 5~8  
刘培生,梁开明. 多孔金属材料制备方法[J]. 功能材料, 2002, (1): 5~8
- 9 Guan Zhenzhong. Laser Processing Technology Handbook[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1998. 58~98  
关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京:中国计量出版社,1998. 58~98