

FR-4 覆铜板飞秒激光微孔加工工艺研究

郭敏超, 王明娣*, 张胜江, 林瑶, 王欣玥, 尹梓航, 王贤宝

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

摘要 针对 FR-4 覆铜板高精度微孔成形中传统机械打孔流程繁琐、精密化程度低等问题, 采用飞秒激光对覆铜板进行单因素试验和正交试验, 以入口直径、出口直径和锥度作为评判指标, 探讨工艺参数对微孔质量的影响规律。结果表明, 对微孔质量影响最大的因素为单脉冲能量, 影响最小的因素为重复频率, 最优工艺参数组合为: 单脉冲能量 29 μJ , 重复频率 92 kHz, 脉冲个数 2112, 离焦量 0.01 mm。采用优化的工艺参数组后, 可以对 FR-4 覆铜板进行高质量和高精度的打孔, 实现快速、高效地制作印刷电路板。

关键词 激光技术; 飞秒激光; FR-4 覆铜板; 打孔; 微孔质量

中国分类号 TN249; V261.8

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1202008

Techniques for Femtosecond Laser Processing of Micro-Holes in FR-4 Copper Clad Laminate

Guo Minchao, Wang Mingdi*, Zhang Shengjiang, Lin Yao, Wang Xinyue, Yin Zihang, Wang Xianbao

School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract As for the high-precision micro-hole formation in FR-4 copper clad laminate, the traditional mechanical drilling process is cumbersome and the degree of precision is low. The femtosecond laser is used to perform the single factor test and the orthogonal test on the copper clad laminate. The inlet diameter, outlet diameter and taper are used as the evaluation indexes to discuss the influence of the process parameters on the quality of micro-holes. The results show that the single pulse energy has the greatest impact on the quality of micro-holes and the repetition rate has the least influence. The optimal process parameter combination is set as single pulse energy of 29 μJ , repetition rate of 92 kHz, pulse number of 2112, and defocusing amount of 0.01 mm. After these optimal process parameters are adopted, high-quality and high-precision drilling of FR-4 copper clad laminate can be performed to realize the rapid and efficient production of printed circuit boards.

Key words laser technology; femtosecond laser; FR-4 copper clad laminate; drilling; micro-hole quality

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引言

印刷电路板(PCB)以精密互连技术为主体,具有多层化和智能化的特点^[1]。为了实现各层间的电气连通,人们对多层 PCB 的过孔(via)提出了越来越高的要求。传统机械钻孔的最小尺寸约为 100 μm ,已不能满足精密化加工的需求,并且传统电路板的制作工艺流程复杂,制作期间需要酸碱腐

蚀溶剂^[2],污染严重且资源消耗巨大,钻孔费用通常占制板费用的 30%~40%^[3]。新型激光微型过孔加工方法正在逐步代替传统的机械钻孔加工方法。

激光加工技术作为先进加工方法已普遍应用于电子、航空和冶金等领域,近年来在微孔加工方面的应用越来越广泛。Kamlage 等^[4]使用脉冲宽度为 150 fs、单脉冲能量为 0.9 mJ 的飞秒激光加工 1 mm 厚的不锈钢钢板,得到了高质量的通孔,并提出具有

收稿日期: 2020-08-12; 修回日期: 2020-08-15; 录用日期: 2020-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(51675360)、苏州市重点产业技术创新一重点研发产业化项目(SGC201924)、苏州市科技计划项目(SYG201805)

*E-mail: wangmingdi@suda.edu.cn

超短脉宽和超高峰功率的飞秒激光是加工高质量微孔的最佳工具。Klein 等^[5]利用掺钛蓝宝石紫外飞秒激光(300 fs)并结合双光子吸收(TPA)和可变光束(位移)技术在聚碳酸酯上加工盲孔,利用多光束干涉方法在钛箔上加工多微孔,试验结果显示,通过结合不同飞秒激光技术,可在多种材料上加工出质量较好的微纳米结构。宫想等^[6]利用 YAG 激光在钢板上进行了激光打孔正交试验,研究了激光工艺参数与孔径之间的关系。尽管国内外学者在激光微孔加工领域进行了一系列研究,但基于超短脉冲技术直接成型导电路径图案和打孔的研究鲜有报道,且飞秒激光技术在印刷电路板制作中的应用较少,也没有将飞秒激光技术用于微孔制作的研究报道^[7]。

本文基于市场对 FR-4 覆铜板的加工需求^[8],从理论和试验的角度研究了飞秒激光与 FR-4 覆铜板不同异质材料间的相互作用,利用飞秒激光对材料进行了微孔工艺研究,得到了适合 FR-4 覆铜板飞秒激光加工的工艺参数,降低了生产成本和污染,提高了微孔精度和质量。

2 试 验

2.1 试验机理

2.1.1 飞秒激光与金属材料的作用机理

飞秒激光加工金属材料的过程可以描述为激光能量在材料内部沉积和喷发的过程,包含非热熔烧蚀和热熔烧蚀两个过程,分隔点为电子-声子耦合的时间。Klein 等^[9]最先提出激光对材料的作用主要是通过电子吸收注入激光束的光子能量,吸收的能量使电子跃迁至激发态,即发生了电离的过程。由于脉冲作用,电子被激发后变得异常活跃,金属材料内部发生了一系列复杂的能量弛豫现象,直至材料内部结构达到稳定。该理论可由飞秒激光与金属材料作用的基本过程及时间尺度图进行描述,如图 1 所示。

由图 1 可知,以激光束到达材料表面的时刻为零点,在 10^{-14} s 时,电子相位发生变动,自由电子吸收飞秒激光的光子能量并跃迁至高能态级,电子的能量分布不变,但极化方向被破坏。在 10^{-13} s 时,高能态电子散布于不同的能级,电子处于准热平衡状态,自由电子的温度高于同一区域晶格的温度。在 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ s 时,准热平衡状态下的电子向周围区域辐射声子,即向外部区域进行能量的传递,电子温度降低并与声子之间达到热平衡。在 $10^{-12} \sim$

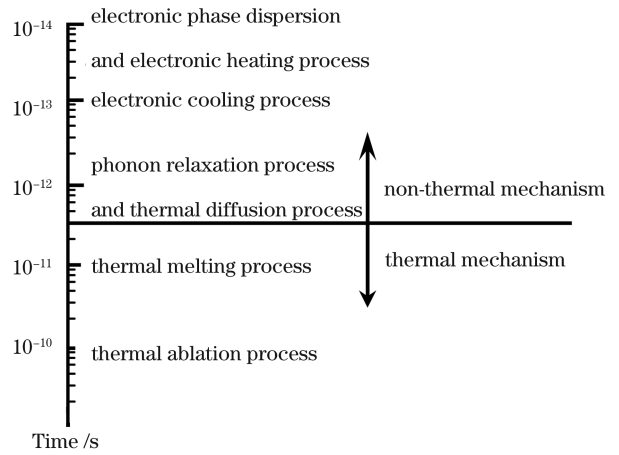


图 1 飞秒激光与金属材料作用的基本过程及时间尺度
Fig. 1 Basic processes and time scales of interaction between femtosecond laser and metal materials

10^{-11} s 时,晶格与声子发生耦合并获得能量,实现电子-晶格之间的能量传递。在 $10^{-11} \sim 10^{-10}$ s 时,晶格与相邻的晶格发生耦合,能量从激光束与材料作用的中心位置处向四周扩散,一部分通过热扩散传递给其他晶格,还有一部分在材料晶格内部沉积。当能量在材料晶格内部的沉积达到一定量的时候,温度达到材料的熔点,导致液化、汽化等物理现象的发生,从而实现材料的去除。

2.1.2 飞秒激光与高分子材料的作用机理

激光烧蚀不同高分子材料的机理不尽相同,但都包含两个基本过程:光化学反应和光热反应。光化学反应是指通过化学反应实现能量的弛豫,激光辐照的光子能量打破了高分子材料的化学键,聚合物被降解为分子碎片,从而实现材料的去除;光热反应主要是利用激光束辐照的能量对材料进行加热,通过高温烧蚀熔化和材料高温喷发的形式去除材料。姜珊珊等^[10]提出不能用某一单模型解释飞秒激光加工高分子材料,各种反应同时进行,并且相互影响,其理论模型如图 2 所示。

在图 2 中,实线双向箭头表示温度场和光学性质之间的关系;虚线双向箭头表示当温度升高时,材料内部会产生应力变化,应力达到一定程度时通过爆炸的形式去除材料。超短脉冲飞秒激光能够增加多光子吸收的面积,通过多光子电离作用去除材料,提高加工效率。由于高分子材料中没有自由电子,因此飞秒激光与高分子材料发生作用,以烧蚀性光分解的形式实现材料的非热熔性去除。本文仅针对光化学反应消熔材料和热作用消熔材料分别进行讨论。当光化学反应起主要作用时,相互作用过程中

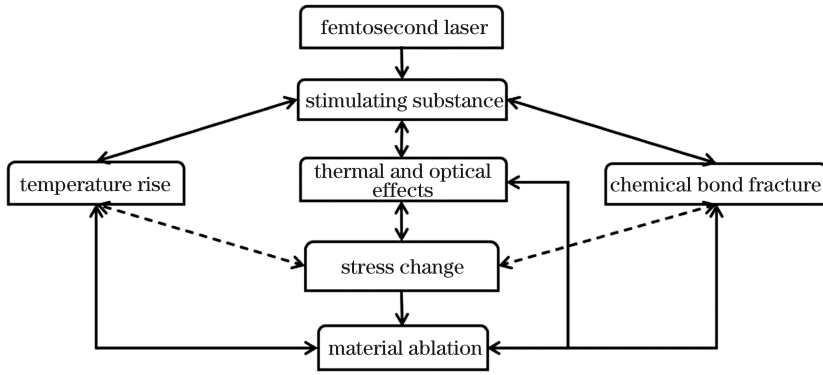


图 2 飞秒激光与高分子材料作用的模型

Fig. 2 Model for interaction between femtosecond laser and polymer material

的光束能量很大,这会导致材料化学键的断裂即发生光化学变化,在纯光化学变化中,材料温度的变化可忽略不计;当热作用起主要作用时,经过玻璃布强化后的环氧树脂为不燃材料,消熔点温度在 1200 K 左右。利用飞秒激光加工铜箔的光束能量和产生的温度,足以对高分子材料进行加工。

2.2 试验材料及设备

试验样品为环氧树脂基双面覆铜板(型号为

FR-4),其是印刷电路板常用的基础材料,表面铜箔的厚度为 18 μm ,铜箔含铜量(质量分数)为 99.9%,基材层环氧树脂厚度为 114 μm 。

本试验设备为立陶宛 LIGHT CONVERSION 公司的 Pharos 15-1000-PP 型号的飞秒激光器,主要性能参数如表 1 所示。利用 ZEISS EVO18 扫描电镜(SEM)对试验后的微孔宏观形貌进行拍摄分析。

表 1 飞秒激光器的主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of femtosecond laser

Parameter	Power	Wavelength	Pulse duration	Frequency	Single pulse energy	Focus spot diameter
Content	6 W	1030 nm /532 nm	255 fs-20 ps	1 MHz	2 mJ	18 μm

2.3 试验方案

首先进行单因素试验,探讨工艺参数对飞秒激光打孔的微孔质量的影响。采用飞秒激光冲击打孔的方法,通过分别改变飞秒激光的单脉冲能量(5 ~ 40 μJ)、重复频率(10 ~ 160 kHz)、脉冲个数(1000 ~ 3000)、离焦量(-0.05 ~ 0.05 mm)等参数,在样品上进行打孔试验。

然后在单因素试验的基础上,安排飞秒激光多脉冲冲击打孔正交试验,对于单脉冲能量(A)、重复频率(B)、脉冲个数(C)和离焦量(D)因素均取 4 个

水平,选用 L16(4⁴)正交试验表来安排正交试验,分别以孔的入口直径、出口直径及锥度作为优化指标,得到不同工艺参数对微孔质量的影响权重,并利用综合平衡法得出最优的打孔工艺参数。

3 试验分析

3.1 单因素试验结果分析

通过分别改变飞秒激光的各项参数,在样品上进行打孔试验,具体加工参数及测量结果如表 2 所示。

表 2 单因素试验的要素安排及结果

Table 2 Element arrangement and results of single factor test

Serial No.	Single pulse energy / μJ	Repetition rate /kHz	Number of pulses	Defocusing amount /mm	Inlet diameter/ μm	Outlet diameter / μm	Taper/($^\circ$)
1	5	40	2000	0	10.56	9.23	0.25
2	10	40	2000	0	11.74	10.92	0.23
3	20	40	2000	0	17.39	16.21	0.21
4	30	40	2000	0	18.16	17.53	0.12
5	40	40	2000	0	22.30	21.94	0.07

Serial No.	Single pulse energy / μJ	Repetition rate /kHz	Number of pulses	Defocusing amount /mm	Inlet diameter / μm	Outlet diameter / μm	Taper/ ($^{\circ}$)
6	20	10	2000	0	16.33	15.15	0.23
7	20	80	2000	0	17.95	16.89	0.20
8	20	120	2000	0	18.23	17.37	0.16
9	20	160	2000	0	18.89	17.65	0.14
10	20	40	1000	0	16.03	15.01	0.19
11	20	40	1500	0	17.32	16.24	0.20
12	20	40	2500	0	17.45	16.27	0.23
13	20	40	3000	0	17.76	16.42	0.26
14	20	40	2000	-0.050	16.22	14.62	0.31
15	20	40	2000	-0.025	14.98	13.58	0.26
16	20	40	2000	0.025	19.46	18.16	0.24
17	20	40	2000	0.050	20.22	18.72	0.29

3.1.1 飞秒激光单脉冲能量对冲击打孔质量的影响

图 3 显示了当重复频率为 40 kHz、脉冲个数为 2000 和离焦量为 0 时,不同单脉冲能量下微孔参数的变化曲线。由图 3 可知,微孔的入口孔径和出口孔径随单脉冲能量的增大而增大,锥度却随单脉冲能量的增大而减小。由于单脉冲能量的增加,聚焦光斑处的能量密度变大,单位时间、单位体积内吸收的能量和能量传递效率增加,材料的去除速率增大。单脉冲能量越大,聚焦光斑处的能量密度越大,单位面积内材料吸收的激光能量越多,能量累积使得越多体质量材料的温度达到沸点而以熔化或汽化的形式被去除^[11]。材料被加工熔池内的高蒸汽压力带出,孔口的重熔层和飞溅物增多,如图 4 所示,加工质量受影响。

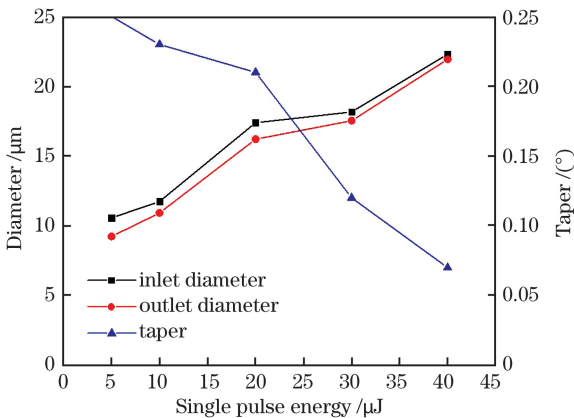


图 3 单脉冲能量对微孔入口直径、出口直径及锥度的影响
Fig. 3 Effect of single pulse energy on inlet diameter, outlet diameter and taper of micro-hole

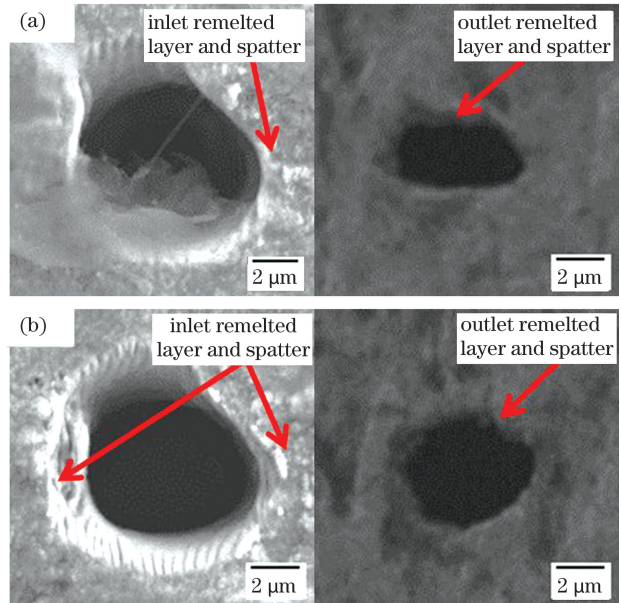


图 4 不同单脉冲能量下的入口和出口 SEM 图。
(a) 5 μJ ; (b) 30 μJ

Fig. 4 Inlet and outlet SEM images under different single pulse energies. (a) 5 μJ ; (b) 30 μJ

3.1.2 飞秒激光重复频率对冲击打孔质量的影响

图 5 显示了当单脉冲能量为 20 μJ 、脉冲个数为 2000 和离焦量为 0 时,不同重复频率下微孔参数的变化曲线。由图 5 可知,随着重复频率的增加,激光作用在铜箔表面的次数增加,材料吸收的能量增多,被去除的材料增多。利用 SEM 研究发现,当重复频率较低时,激光注入的能量不足且单位时间内的触发脉冲数较少,加工过程中产生的等离子或残渣无法脱离,所以微孔入口和孔壁处会有残渣等,如图

6(a)所示,此时重复频率为 80 kHz。当重复频率较高时,微孔孔口的形貌较好且表面重铸层较少,加工质量得到明显提高,如图 6(b)所示,此时重复频率为 160 kHz。

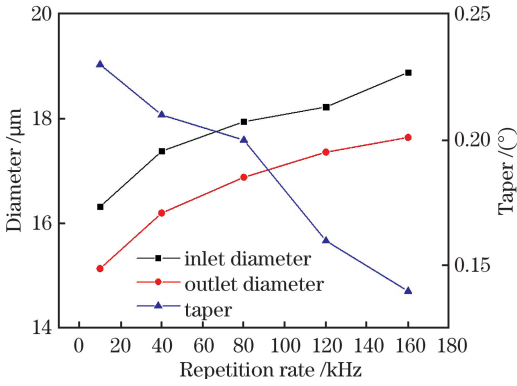


图 5 重复频率对微孔入口直径、出口直径及锥度的影响
Fig.5 Effect of repetition rate on inlet diameter, outlet diameter and taper of micro-hole

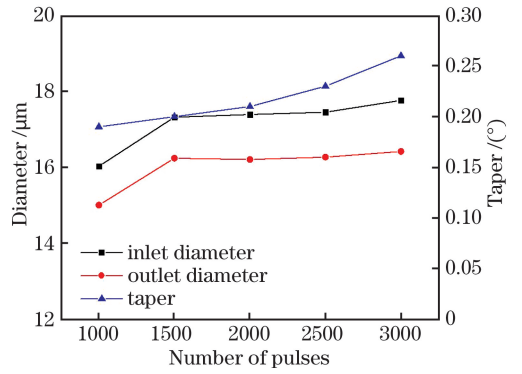


图 7 脉冲个数对微孔入口直径、出口直径及锥度的影响
Fig.7 Effect of number of pulses on inlet diameter, outlet diameter and taper of micro-hole

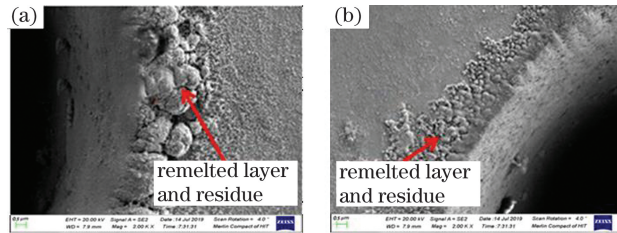


图 6 不同重复频率下的入口局部 SEM 图。(a) 80 kHz;
(b) 160 kHz

Fig.6 Local inlet SEM images under different repetition rates. (a) 80 kHz; (b) 160 kHz

3.1.3 飞秒激光脉冲个数对冲击打孔质量的影响

图 7 显示了当单脉冲能量为 20 μJ、重复频率为 40 kHz 和离焦量为 0 时,不同脉冲个数下微孔参数的变化曲线。由图 7 可知,随着脉冲个数的增加,激光与覆铜板作用的次数增加,材料处于熔化和汽化蒸发状态中,熔池变大,孔口附近的残渣和颗粒状碎片陆续从孔口喷出,微孔的入口孔径逐渐变大;同时,微孔表面材料已被基本去除,剩余的激光能量使得微孔深度加大^[12],微孔的出口孔径和锥度随之变大,如图 8 所示。利用 SEM 研究发现,随着脉冲个数的增加,微孔圆度也会发生变化,如图 9 所示。当脉冲个数为 1000 时,微孔入口的圆度较差,当脉冲个数为 3000 时,虽然微孔入口的圆度有所改善,但是入口表面的残渣和重铸层增多。

3.1.4 飞秒激光离焦量对冲击打孔质量的影响

图 10 显示了单脉冲能量为 20 μJ、重复频率为 40 kHz 和脉冲个数为 2000 时,不同离焦量下微孔

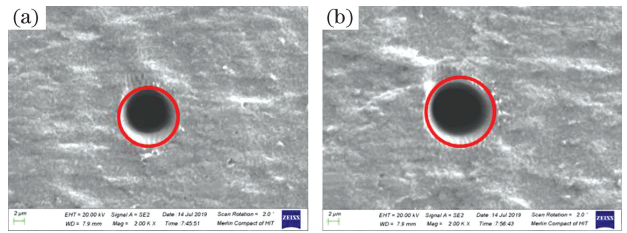


图 8 不同脉冲个数下的入口 SEM 图。(a) 1000; (b) 3000
Fig.8 Inlet SEM images under different numbers of pulses.

(a) 1000; (b) 3000

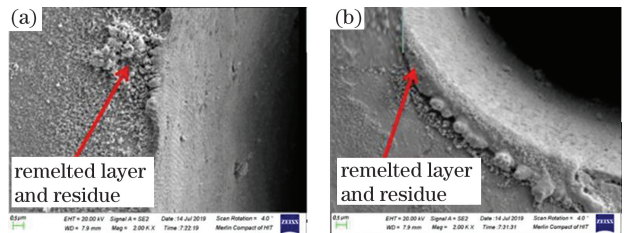


图 9 不同脉冲个数下的入口局部放大图。(a) 1000;
(b) 3000

Fig.9 Locally enlarged inlet images under different numbers of pulses. (a) 1000; (b) 3000

参数的变化曲线。由图 10 可知,当焦点位于工件表面时,聚焦光斑的直径最小,能量密度最高,微孔孔径最小;离焦量绝对值越大,微孔孔径越大。利用 SEM 研究发现,当离焦量为正时,微孔圆度较差,当离焦为负时,微孔圆度较好,而当离焦量为零时,微孔圆度适中,处于两者之间,如图 11 所示。这是因为飞秒激光聚焦后,具有极高能量密度的激光能够击穿空气并发生电离反应^[13],且非线性效应强烈,聚焦后的光斑能量的分布并非理想的高斯分布,当离焦量为正时,光斑聚焦位于工件加工面上方,加工表面发生了空气电离现象,因此微孔圆度较差。

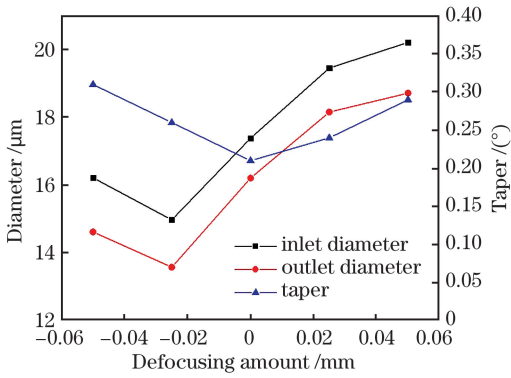


图 10 离焦量对微孔入口直径、出口直径及锥度的影响
Fig.10 Effect of defocusing amount on inlet diameter, outlet diameter and taper of micro-hole

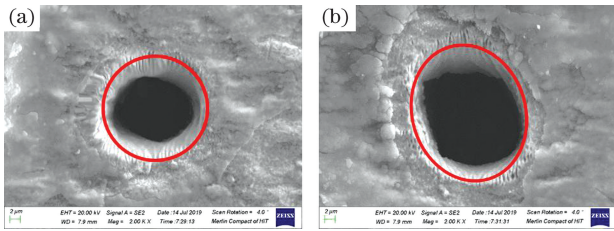


图 11 不同离焦量下微孔的圆度。(a) -0.05 mm;
(b) 0.05 mm

Fig.11 Roundness of micro-hole under different defocusing amounts. (a) -0.05 mm; (b) 0.05 mm

3.2 正交试验结果与分析

本试验中四因素均取用四水平因子,如表 3 所示,选用 L16(44)正交试验表来安排正交试验,分别以孔的入口直径、出口直径及锥度作为优化指标,试验要素安排及结果如表 4 所示。

表 3 因素水平表
Table 3 Factor levels

Level	Single pulse energy /μJ	Repetition rate /kHz	Number of pulses	Defocusing amount /mm
1	15	40	1200	0
2	22	66	1646	0.01
3	29	92	2112	0.02
4	35	120	2200	0.04

表 5 极差分析
Table 5 Range analysis

Item	Average	Single pulse energy /mW	Repetition rate/kHz	Number of pulses	Defocusing amount /mm
Inlet diameter	k_1	15.323	15.745	16.228	16.325
	k_2	17.745	18.105	17.730	18.018
	k_3	17.728	18.798	18.205	17.200
	k_4	17.545	15.693	16.178	16.798
	Range	2.422	3.105	2.027	1.693

表 4 正交试验要素安排及结果
Table 4 Element arrangement and results of orthogonal test

Serial No.	Level				Inlet diameter/μm	Outlet diameter/μm	Taper/°
	A	B	C	D			
1	1	1	1	1	12.83	-	-
2	1	2	2	2	17.87	6.37	2.19
3	1	3	3	3	18.21	11.59	1.26
4	1	4	4	4	12.38	11.24	0.22
5	2	1	2	3	16.81	12.03	0.91
6	2	2	1	4	17.56	15.49	0.40
7	2	3	4	1	17.74	15.57	0.42
8	2	4	3	2	18.87	18.23	0.12
9	3	1	3	4	17.17	13.36	0.73
10	3	2	4	3	18.42	17.88	0.10
11	3	3	1	2	19.16	17.68	0.24
12	3	4	2	1	16.16	14.03	0.41
13	4	1	4	2	16.17	14.51	0.32
14	4	2	3	1	18.57	16.23	0.45
15	4	3	2	4	20.08	18.92	0.22
16	4	4	1	3	15.36	13.97	0.27

利用极差分析法,求出各因素水平的平均响应度和极差数据,如表 5 所示,其中 k_1 为每个因素取第一水平时响应实验结果的平均值, k_2 为每个因素取第二水平时响应实验结果的平均值,以此类推; Range 为各个因素在 4 个水平中平均值的极差值。利用极差分析法,可得出各因素对入口孔径、出口孔径和锥度的影响权重。

Item	Average	Single pulse energy /mW	Repetition rate/kHz	Number of pulses	Defocusing amount /mm
Outlet diameter	k_1	7.300	9.975	11.835	11.458
	k_2	15.330	13.993	12.834	14.248
	k_3	15.788	15.990	14.852	13.868
	k_4	15.908	14.368	14.800	14.753
	Range	8.608	6.015	3.017	3.173
Taper	k_1	0.918	0.490	0.223	0.228
	k_2	0.463	0.785	0.933	0.718
	k_3	0.370	0.535	0.640	0.635
	k_4	0.315	0.255	0.265	0.393
	Range	0.603	0.530	0.710	0.490

由表 5 入口直径极差分析可知,工艺参数对微孔入口质量的影响权重从大到小依次为重复频率、单脉冲能量、脉冲个数和离焦量。当脉冲个数持续增加时,激光脉冲与材料相互作用的次数增加,当入口孔径达到一定值时,脉冲能量主要用于微孔深度和底部孔径的加工,激光对入口的加工效果减弱。随着单脉冲能量的增加,激光能量密度增大,熔池表面的蒸汽压力变大,向外喷发的材料增多,入口孔径增大。飞秒激光多脉冲打孔技术主要应用于精密器件的微加工制造,微孔孔径越小越好。因此,对于 FR-4 覆铜板的飞秒激光多脉冲冲击打孔的入口而言,最优工艺参数组合是 $A_2B_2C_3D_2$,即单脉冲能量为 $22 \mu\text{J}$,重复频率为 66 kHz ,脉冲个数为 2112 ,离焦量为 0.01 mm 。

由表 5 出口直径极差分析可知,工艺参数对微孔出口质量的影响权重从大到小依次为单脉冲能量、重复频率、离焦量和脉冲个数。高重复频率使得激光烧蚀过程中产生了等离子体屏蔽效应,烧蚀速率降低,但当重复频率更高时,熔池内热效应的累积会降低等离子体屏蔽效应,离子喷发现象减少甚至消失,虽然微孔表面质量得到提高,但是出口的孔径变小。当离焦量的绝对值增大到一定值时,激光击穿空气产生电离现象,此过程的非线性效应强烈,光斑能量的分布不是严格的高斯分布,出口孔径也相应变小。因此,对于 FR-4 覆铜板的飞秒激光多脉冲冲击打孔的出口而言,最优工艺参数组合为 $A_4B_3C_3D_4$,即单脉冲能量为 $35 \mu\text{J}$,重复频率为 92 kHz ,脉冲个数为 1000 ,离焦量为 0.04 mm 。

由表 5 锥度极差分析可知,工艺参数对微孔锥

度质量的影响权重从大到小依次为脉冲个数、单脉冲能量、重复频率和离焦量。当重复频率较高时,加工过程中产生的残渣和颗粒会被击碎成更小的颗粒并随蒸汽向外喷发,微孔的加工质量较高,但微孔的锥度较大。因此,对于 FR-4 覆铜板的飞秒激光多脉冲冲击打孔的微孔锥度而言,最优工艺参数组合为 $A_4B_4C_4D_1$,即单脉冲能量为 $35 \mu\text{J}$,重复频率为 120 kHz ,脉冲个数为 2200 ,离焦量为 0 。

根据综合平衡法准则,得出 FR-4 覆铜板的飞秒激光多脉冲冲击打孔的最优工艺参数组合为 $A_3B_3C_3D_2$,即单脉冲能量为 $29 \mu\text{J}$,重复频率为 92 kHz ,脉冲个数为 2112 ,离焦量为 0.01 mm 。

3.3 试验验证

为了更加贴近实际应用环境,微孔验证试验选用自制的印刷电路板(PCB)布线图(如图 12 所示)中的局部作为加工图形。图 12 中矩形框内线路末端圆点为打孔区域,根据试验分析得到的最优工艺参数,直接在刻蚀成形的线路末端进行打孔。

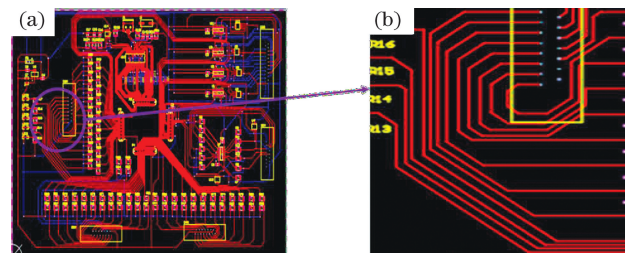


图 12 传统 PCB 板线路图。(a)整体电路;(b)局部电路
Fig.12 Schematic of traditional PCB board circuit.
(a) Overall circuit; (b) local circuit

微孔加工结束后,利用超景深显微镜对孔的表

面形貌进行拍摄分析,如图 13 所示。可以看出,选用优化后的加工参数,微孔的加工质量得到了极大的提升,微孔入口和出口的成形质量较好,且圆度得到了极大的改善,入口处的残渣和重熔层减少,出口处的残渣减少,避免了残渣堆积形成的锯齿状重熔层。经过测算分析可知,图 13(b)中微孔入口直径的平均值为 $30.21 \mu\text{m}$,图 13(c)中微孔出口直径的平均值为 $28.93 \mu\text{m}$,锥度为 0.24° 。微孔质量的提高有利于实现良好的电气连接。与此同时,在线路末端加工微孔也没有造成线路质量的下降,如图 14 所示。

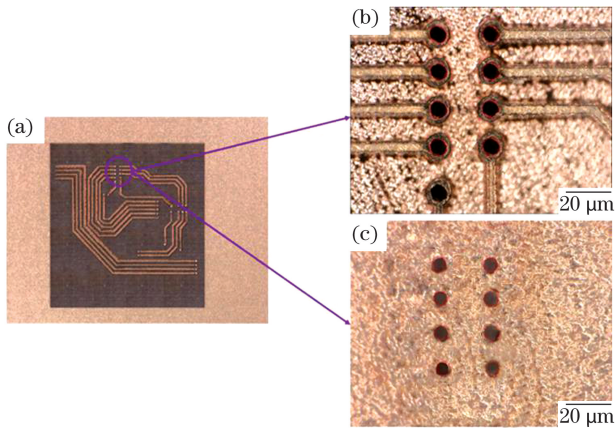


图 13 加工图片。(a)加工窗口;(b)微孔入口形貌;(c)微孔出口形貌
Fig.13 Processing pictures. (a) Processing window; (b) micro-hole inlet morphology; (c) micro-hole outlet morphology

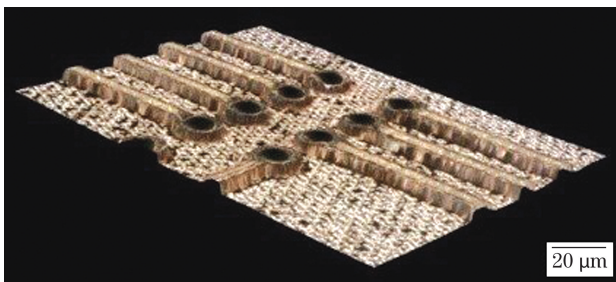


图 14 线路末端的三维形貌

Fig.14 Three-dimensional morphology of line end

4 结 论

采用单因素试验和正交试验相结合的方法,对飞秒激光微孔加工的工艺参数进行了研究,得到以下结论。

1)在单脉冲能量为 $29 \mu\text{J}$ 、重复频率为 92 kHz 、脉冲个数为 2112、离焦量为 0.01 mm 的工艺参数下进行飞秒激光微孔加工,微孔质量佳,无需多次加

工或更换设备和参数。

2)在飞秒激光打孔试验中,单脉冲能量和离焦量对微孔质量的影响程度较小,因此,在实际激光加工时,可以选择较高的单脉冲能量,以获得较高的加工效率。

覆铜板的规格多种多样,需要进行更深层次探索,以分析研究出不同规格的覆铜板的加工最优参数。

参 考 文 献

[1] Yang J J. Femtosecond laser “cold” micro-machining and its advanced applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(3): 42-52, 57.
杨建军. 飞秒激光超精细“冷”加工技术及其应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(3): 42-52, 57.

[2] Huang H Y. Cadence high-speed PCB design and simulation analysis [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006.
黄豪佑. Cadence 高速 PCB 设计与仿真分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.

[3] Zhao B, Zhai Q X, Zhou W T. A production method of copper embedded PCB [J]. Printed Circuit Information, 2016, 24(5): 50-54.
赵波, 翟青霞, 周文涛. 一种嵌埋铜 PCB 制作方法 [J]. 印制电路信息, 2016, 24(5): 50-54.

[4] Kamlage G, Chichkov B N, Ostendorf A, et al. Deep drilling of metals by femtosecond laser pulses [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4760: 394-397.

[5] Wang Q, Xia Y Q, Chen D Y, et al. High-order harmonic generation in krypton with femtosecond Ti: sapphire laser [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(5): 534-537.
王骥, 夏元钦, 陈德应, 等. 掺钛蓝宝石飞秒激光在氩气中的高次谐波 [J]. 光学学报, 2001, 21(5): 534-537.

[6] Gong X, Li Z G, Chen D M. Analysis on factors affecting the quality of drilling on stainless steel with YAG laser [J]. Journal of Changchun University, 2012, 22(2): 141-144.
宫想, 李占国, 陈岱民. YAG 激光在不锈钢上打孔质量影响因素分析 [J]. 长春大学学报, 2012, 22(2): 141-144.

[7] Zhang X, Liu K, Wang M D, et al. Etching technology for copper-clad laminates based on femtosecond laser [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1214003.
张晓, 刘凯, 王明娣, 等. 基于飞秒激光的覆铜板刻蚀工艺 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1214003.

[8] Di W F, Li D, Dong Z J, et al. Design of PCB board

- automatic placement system based on machine vision [J]. Automation & Instrumentation, 2018, 33(10): 59-63, 98.
- 邸伟峰, 李迪, 董志劼, 等. 基于机器视觉的 PCB 板自动贴装系统设计 [J]. 自动化与仪表, 2018, 33(10): 59-63, 98.
- [9] Klein-Wiele J H, Bekesi J, Simon P. Sub-micron patterning of solid materials with ultraviolet femtosecond pulses [J]. Applied Physics A, 2004, 79(4/5/6): 775-778.
- [10] Jiang S S, Cai J X, Jin G Y, et al. Research of damage morphology of carbon fiber epoxy resin irradiated by millisecond/nanosecond pulsed laser [J]. Laser Technology, 2018, 42(6): 775-779.
- 姜珊珊, 蔡继兴, 金光勇, 等. 毫秒/纳秒激光致碳纤维环氧树脂损伤形貌研究 [J]. 激光技术, 2018, 42(6): 775-779.
- [11] Li T T, Zhang M J, Tian K Z, et al. Femtosecond laser-induced damage on Ge-Sb-S chalcogenide glass [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1016001.
- 李铜铜, 张鸣杰, 田康振, 等. Ge-Sb-S 硫系玻璃的飞秒激光诱导损伤研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1016001.
- [12] Zhang L, Zhai Z S, Lv Q H, et al. Research on efficient parallel femtosecond laser micro-drilling technique [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2018(4): 18-21, 32.
- 张骆, 翟中生, 吕清花, 等. 飞秒激光高效并行微孔加工技术研究 [J]. 湖北工业大学学报, 2018(4): 18-21, 32.
- [13] Guo T Y, Zhang L M, Ren Y Y, et al. Surface characteristics of CaF₂ crystal ablated by femtosecond laser [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0126019.
- 郭太勇, 张立木, 任莹莹, 等. 飞秒激光烧蚀氟化钙晶体表面特性 [J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0126019.