

文章编号: 0258-702X(2002)02-0176-05

激光精密切割不锈钢模板割缝质量控制

李祥友, 曾晓雁

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

提要 采用 Nd:YAG 激光对 0.2 mm 厚的不锈钢模板精密切割, 系统研究了激光切割工艺参数对缝壁表面粗糙度、缝壁表面残留物的影响规律, 结果表明: 提高重复频率、功率密度、脉冲宽度以及降低扫描速度, 均可改善切缝质量。导出了描述脉冲激光切割切缝表面粗糙度的公式, 利用该公式可以较好地解释本文的实验结果。最后, 提出了控制激光精密切割切缝缝壁质量的方法。

关键词 激光精密切割 粗糙度 脉冲切割 质量控制

中图分类号 TG 485 文献标识码 A

Kerf Roughness and Quality Control of Laser Precision Cutting

LI Xiang-you, ZENG Xiao-yan

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of
Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract In this paper, the stainless stencil with 0.2 mm thickness was cut by Nd:YAG pulse laser. The effect of laser cutting parameters on surface roughness of kerf, splash and residue of kerf surface was studied systematically. The results showed that with the increasing of repetition frequencies, power density, and pulse width of laser beam and with the decreasing of scanning speed, the kerf quality could be improved. Besides, a formula of estimating the kerf surface roughness was also presented, which can explain the experiment results well.

Key words laser precision cutting, roughness, pulse cutting, quality control

1 引言

用于切割的激光源有连续和脉冲两种工作模式。连续激光切割加工效率高, 但对于薄板以及精密加工来说, 采用脉冲工作方式, 可以显著减小热影响区, 提高切缝的表面质量^[1]。

在加工电子行业中表面组装用的模板(PCB stencil)时, 一般采用化学刻蚀法, 其缺点是加工精度低、工序多、周期长, 特别是受刻蚀因子的限制, 模板的最小缝隙宽度不能低于模板厚度的 1/2, 因而难以满足日益发展的微电子技术对电子线路制作精度的要求。采用激光精密切割技术对模板进行加工, 不仅可以降低加工成本, 缩短加工周期, 提高加工精度, 而且可对成品模板进行再加工。

切缝缝壁质量的好坏对模板的后续应用是否成

功起着至关重要的作用, 缝壁质量不好会导致在涂料时出现挂浆现象。而缝壁粗糙度、残留物以及挂渣等是衡量激光切割质量的重要方面。迄今为止, 采用 CO₂ 激光连续方式切割厚板的工艺及机理以及质量控制方面的研究, 国内外已有不少文献报道^[2~5], 但对于脉冲激光切割薄板的质量控制研究很少见到文献报道^[6]。为此, 本文利用 Nd:YAG 激光器对不锈钢薄板切割质量控制进行了实验, 探讨了激光切割工艺参数对粗糙度等影响的一般规律。

2 实验方法与设备

切割试样选用 0.2 mm 厚的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 规格 260 mm × 195 mm。不锈钢为单面抛光, 并且抛光面为加工上表面。实验采用华中科技大学激光

收稿日期 2000-12-27; 收到修改稿日期 2001-09-22

作者简介 李祥友(1975—), 男, 华中科技大学激光院博士生, 主要从事激光精密加工及激光先进制造方面的研究。E-mail: lixiangyou@263.net

公司生产的 Nd:YAG 固体脉冲激光器,波长为 1.06 μm ,脉宽有 0.2 ms 和 0.5 ms 两档,重复频率 0~100 Hz 可调,激光经过透镜聚焦后垂直入射到工件表面。工作台由一台 586 微机自动控制。采用氧气作为辅助气体,气压约为 0.5 MPa,喷嘴直径为 ϕ 1.5 mm。通过改变不同的工艺参数,来探讨影响切割质量的规律。

实验采用 Carlzeiss JENA 双管显微镜测量切缝缝壁表面波峰或波谷的高度^[7]。每个样品选取五个点测量后求算术平均值。

实验时选用十种不同的速度(2~20 mm/s),在不同激光工艺参数下利用微机自动控制连续加工十条平行的切缝,缝间距为 5 mm,单缝长度为 50 mm。加工后的上表面用酒精棉球擦拭,以去除表面飞溅物,然后用金相显微镜观察切缝表面形貌。

最后把试样剪开,采用 JSM-35C 扫描电子显微镜(SEM)观察切缝断口的形貌以及残留物形态。

3 实验结果

3.1 缝壁粗糙度

实验中缝壁粗糙度随扫描速度变化的数据详见表 1。由表中数据可见,随着扫描速度的提高,其粗糙度有上升的总趋势。

缝壁粗糙度随激光功率密度变化的数据详见表 2。由表中数据可见,随着功率密度的提高,粗糙度逐渐减小。

缝壁表面粗糙度随激光重复频率变化的数据详见表 3。可以看出,随重复频率提高,缝壁粗糙度显著减小。由此可见,重复频率的提高可以大幅度降低缝壁表面的粗糙度。

本实验所用激光脉宽对粗糙度的影响规律见表 4。可见,在本试验条件下,随着脉宽的提高,表面粗糙度略有下降。

3.2 切缝缝壁表面形貌

典型参数下的切缝缝壁表面形貌的扫描电镜

表 1 不同扫描速度下的粗糙度数据

Table 1 Roughness data under various scanning speed

Velocity/mm·s ⁻¹	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Roughness/ μm	11.2	15.4	13.0	14.3	13.1	16.7	17.6	17.6	17.1	19.5

Power density : $5.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$; Pulse width : 0.2 ms ; Frequencies : 100 Hz.

表 2 不同功率密度下的粗糙度数据

Table 2 Roughness data under various power density

Power density/ $\times 10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$	1.4	4.2	6.6	10.1
Roughness/ μm	29.2	22.9	19.3	16.5

Scanning speed : 4 mm/s ; Pulse width : 0.5 ms ; Frequencies : 45 Hz.

表 3 不同重复频率下的粗糙度数据

Table 3 Roughness data under various frequencies

Frequency/Hz	40	60	80	100
Roughness/ μm	28.7	23.3	15.1	10.9

Scanning speed : 4 mm/s ; Pulse width : 0.2 ms ; Power density : $5.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$.

表 4 不同脉宽下的粗糙度数据

Table 4 Roughness data under various pulse width

Pulse width/ms	0.2	0.5
Roughness/ μm	21.2	19.3

Scanning speed : 4 mm/s ; Frequencies : 45 Hz.

(SEM)照片详见图 1。从图中可以看出,随着扫描速度提高,缝壁表面的残留物增多(图 1(a),(b),(e)其中(b)为(a)的放大像);增大功率密度(图

1(a)(f))或者提高重复频率(图 1(a)(c)),可以显著减少残留物;脉宽增大,残留物变少(图 1(c),(d))。

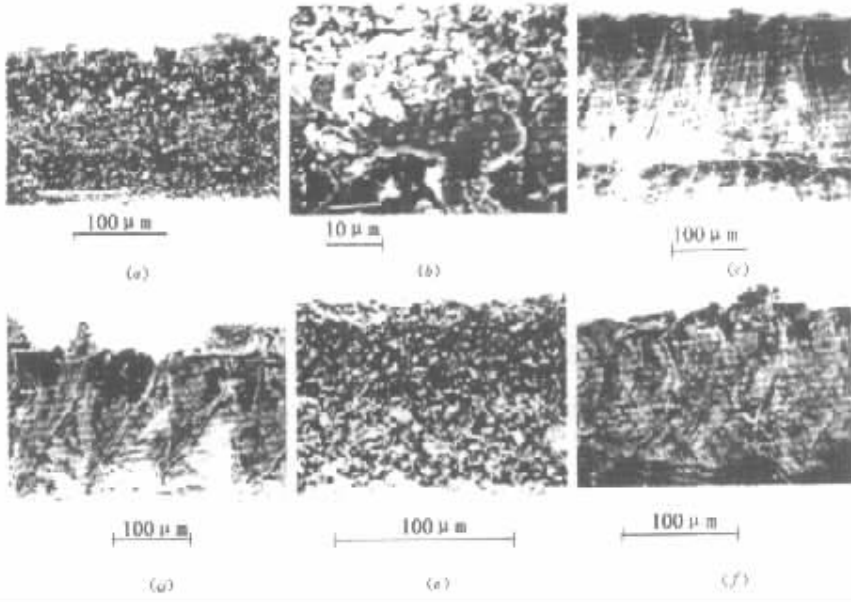


图 1 切缝断口的扫描电镜形貌

(a)(b)功率密度 $5.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 脉宽 0.2 ms 频率 :100 Hz 扫描速度 4 mm/s ;(c)功率密度 $5.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 脉宽 0.2 ms 频率 :45 Hz , 扫描速度 4 mm/s ;(d)功率密度 $6.6 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 脉宽 :0.5 ms 频率 :45 Hz 扫描速度 :4 mm/s ;(e)功率密度 $5.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 脉宽 : 0.2 ms 频率 :100 Hz 扫描速度 20 mm/s ;(f)功率密度 $6.6 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 脉宽 0.2 ms 频率 :100 Hz 扫描速度 4 mm/s

Fig.1 SEM micrograph of kerf

(a)(b)power density : $5.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, pulse width :0.2 ms , frequencies :100 Hz , scanning speed :4 mm/s ;(c)power density : $5.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, pulse width :0.2 ms , frequencies :45 Hz , scanning speed :4 mm/s ;(d)power density : $6.6 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, pulse width :0.5 ms , frequencies :45 Hz , scanning speed :4 mm/s ;(e)power density : $5.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, pulse width :0.2 ms , frequencies :100 Hz , scanning speed : 20 mm/s ;(f) power density : $6.6 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, pulse width :0.2 ms , frequencies :100 Hz , scanning speed :4 mm/s

4 结果讨论与分析

4.1 割缝缝壁表面粗糙度的来源

材料表面粗糙度的表示方法有很多。我们采用的是微观不平度十点高度 R_z 作为其评定参数 :即在取样长度内 5 个最大轮廓峰高的平均值与 5 个最大的轮廓谷深的平均值之和 ,其表达式为

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{vi} \right) \quad (1)$$

上式中 y_{pi} 和 y_{vi} 分别为轮廓波峰、波谷的值。

激光切割 (包括连续和脉冲方式) 的缝壁表面粗糙度的来源一般认为有如下几个方面 :

1) 由于切割存在熔融、气化 ,就必然有飞溅及熔滴的产生 ,当这些物质残留于缝壁表面时 ,就形成了表面凹凸不平的形貌 ;

2) 由于激光切割是一个加热-熔融-材料去除-缝壁冷却的周期往复的过程 ,当氧化速度大于切割速度时 ,就会产生切割所特有的条纹形貌 ,即人们俗称的辉纹^[8] ;

3) 工作台的振动以及电源能量的波动。

对于脉冲激光切割 ,由于切割方式是脉冲式的 ,因而其表面粗糙度除了以上几点外 ,还与扫描速度、重复频率的关系十分密切。下面将作重点讨论。

图 2 为脉冲激光切割的原理示意图 ,从图中可以看出 ,先后两个脉冲与边缘交割的区域的最大位置 (图 2 中的 h 位置) 对粗糙度的贡献最大。利用几何原理很容易得到如下公式

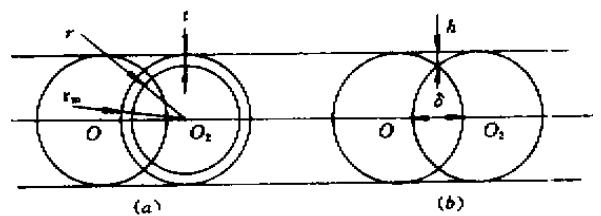


图 2 脉冲激光切割原理示意

(a) 一个脉冲切割开始 (b) 一个脉冲切割结束

Fig.2 Schematic diagram of laser pulse cutting processing

(a) start of a laser pulse ;(b) end of a laser pulse

$$h = r_m - \sqrt{r_m^2 - \left(\frac{v}{2f}\right)^2} \quad (2)$$

式中, h 为表轮廓的最高高度, 对应于式(1)中波峰与波谷的最大差值; r_m 为切缝宽度的一半; v 为扫描速度; f 为重复频率。

下面利用该公式详细讨论切缝宽度、扫描速度以及重复频率等激光工艺参数对切缝粗糙度的影响。

4.2 重复频率对缝壁粗糙度的影响

在脉冲切割中, 重复频率是影响切割质量的重要参数。它对缝壁的表面残留物以及粗糙度都有着至关重要的影响。结合公式(2)可以看出, 固定 r_m , 当 $f \rightarrow \infty$ 或 $v \rightarrow 0$ 时, $h \rightarrow 0$, 它表示由于脉冲激光的固有因素所导致的粗糙度为 0, 此时对表面粗糙度的影响就只与上述前三个因素有关, 而受脉冲激光所产生的轮廓影响很小; 当 $v/f = 2r_m$ 时, $h = r_m$, 此时表示两相邻激光脉冲相切, 它对表面粗糙度影响达到最大。另外, 图 1 中可以明显看出, 当频率由 45 Hz 提高到 100 Hz 时, 其表面附着物明显减少, 与表 3 中频率提高时其表面粗糙度明显减小相对应。由此可见, 提高脉冲激光器的重复频率是降低缝壁表面粗糙度、提高切割质量的重要途径。

4.3 扫描速度对缝壁粗糙度的影响

图 3 (其他参数见表 1) 中, 我们得到不同扫描速度下的实验值以及利用公式(2)所得的计算值。从该图中可以看出, 两者的变化趋势相同, 均随速度的提高其粗糙度增大, 但理论值与实验值曲线出现交叉, 其原因主要有如下几点:

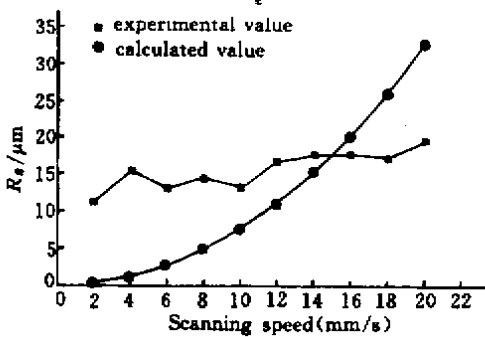


图 3 扫描速度对缝壁粗糙度的影响

Fig.3 Effect of scanning speed on kerf roughness

1) 由前面的讨论可知, 当速度较低时, 影响其粗糙度的主要因素并不是脉冲不连续所致, 而是受切割时辅助吹气等的影响, 使缝壁表面残留熔渣和

飞溅造成表面不平 (见图 1(a) 和 (e)), 以及激光切割速度较低时所产生的辉纹所致。

2) 随着速度的提高, 相邻脉冲间的重叠度越来越小, 切割所受脉冲激光本身特点的限制就越来越明显, 此时, 其主要因素应为相邻激光光斑的重叠度的大小。即公式(2)中 h 的影响越来越明显。

3) 但图 3 中理论计算值在速度较高时比实测值要高, 其原因有二: 一是由于速度的提高, 缝壁表面的飞溅及残留物增多 (见图 1), 导致飞溅及残留物填充了脉冲光斑所形成的凸凹不平处, 从而使粗糙度有所下降。二是在测量粗糙度时, 由于是测量一段区域的平均值, 这样即使 h 很大, 当与相邻区域平均后, 粗糙度就会变小。

4.4 脉冲宽度和功率密度对缝壁粗糙度的影响

假定 $v \frac{\partial h}{\partial r_m}$ 不变, 把公式(2)两边对 r_m 求偏导得

$$\frac{\partial h}{\partial r_m} \Big|_{(v, f)} = 1 - \frac{v^2}{4r_m^2} \frac{1}{\sqrt{r_m^2 - \left(\frac{v}{2f}\right)^2}} \quad (3)$$

$$\text{又因为 } r_m > \sqrt{r_m^2 - \left(\frac{v}{2f}\right)^2}$$

$$\text{所以 } \frac{\partial h}{\partial r_m} \Big|_{(v, f)} < 0 \quad (4)$$

公式(4)表示随着切缝宽度的增加, 缝壁粗糙度单调减小。当功率密度和脉冲宽度增加时, 由于热积累效应, 激光切缝宽度 r_m 加大, 因而其粗糙度减小; 另外, 在实验中, 随着功率密度和脉冲宽度的增加, 缝壁表面的附着物减少, 也使粗糙度降低。表 2 和表 4 的实验数据很好地说明了这一结论。

4.5 光斑直径

由于光斑直径与切缝宽度关系密切, 公式(4)似乎说明随着光斑直径的减小, 粗糙度增加。事实上上述结论是在假定扫描速度 v 与重复频率 f 不变的前提下得到的。如果我们引入脉冲激光切割时重叠度的概念, 如图 2 所示, 它代表相邻激光光斑重叠的程度, 用 $\alpha = \delta / (2r_m)$ 表示, 它与扫描速度 v , 割缝半宽 r_m 及重复频率 f 之间的关系为(5)式 (详见参考文献 [9])

$$\alpha = \left(1 - \frac{v}{2r_m \cdot f}\right) \times 100\% \quad (5)$$

与(2)合并化简可得式(6)

$$h = r_m(1 - \sqrt{2\alpha - \alpha^2}) \quad (6)$$

由公式(6)可知, 在激光切割重叠度 α 不变的前提下, 随着 r_m 减小, 其粗糙度减小。换句话说, 激光割缝表面粗糙度随光斑直径的变化规律取决于所假定的前提条件。 v/f 不变时, h 随 r_m 的增加而减

少 激光切割时相邻脉冲激光光斑的重叠度 α 不变时, h 随 r_m 的增加而增加。

5 结 论

综上所述,关于控制缝壁表面的质量方面,我们得到如下结论:

1) 提高脉冲激光器的重复频率,可以显著地提高切割质量;

2) 增大脉冲宽度,提高功率密度,由于增加了切缝宽度,其切割质量也可得到提高;

3) 在脉冲重复频率有限但对切缝质量要求较高的场合,可以适当牺牲加工效率,如降低扫描速度,来提高其切割质量;

4) 导出了如下两个公式,利用它们可以在给定条件下定性分析缝壁表面粗糙度

$$h = r_m(1 - \sqrt{2\alpha - \alpha^2})$$

和

$$h = r_m - \sqrt{r_m^2 - \left(\frac{v}{2f}\right)^2}$$

参 考 文 献

- 1 Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling. Status and prospect of precision laser machining[J]. *Laser Journal* (激光杂志), 2000, **21**(5): 1~3 (in Chinese)
- 2 Yan Yuhe, Zhong Minlin. High Power Laser Machining and Applications[M]. Press of Tianjing Science and Technology, 1994. 56 (in Chinese)
- 3 Liu Donghua. Laser cutting[J]. *Laser Journal* (激光杂志), 1992, **13**(4): 207~213 (in Chinese)
- 4 Duncan P. Hand, Julian D. C. Jones. Single-mode fiber delivery of Nd:YAG light for precision machining applications[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(9): 1602~1606
- 5 Li Chenghou. Civil and oversea Survey of Laser processing technology[J]. *Electric Process Technology* (电子工艺技术), 1992, **18**(4): 29 (in Chinese)
- 6 H. Kaebernick, D. Bicleanu, M. Brandt. Theoretical and experimental investigation of pulsed laser cutting[J]. *Annals of the CIRP*, 1999, **48**(1): 163
- 7 Yao Caixian. Interchangeable Character and Technological Measure Experiment[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1992 (in Chinese)
- 8 Miyamoto, H. Maruo (Japan). The mechanism of laser cutting[J]. *Welding in the World*, 1991, **29**(9/10): 283
- 9 Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan, Liu Yong *et al.*. Study of YAG laser cutting process with stainless steel sheet[J]. *J. Chinese Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(12): 1125~1129 (in Chinese)