

文章编号: 0258-7025(2001)12-1125-05

激光精密切割不锈钢薄板的工艺研究

李祥友¹ 曾晓雁^{1*} 刘 勇¹ 许伟涛¹ 黄维玲²

(华中科技大学¹ 激光模具技术国家重点实验室,² 激光加工工程中心 武汉 430074)

提要 采用 Nd:YAG 脉冲激光器对不锈钢进行了精密切割。系统研究了工艺参数对切缝宽度和切缝质量的影响规律。结果表明,缝宽随激光功率密度、频率以及脉宽的增加而加大,提高激光输出重复频率,不仅有利于提高加工质量,而且可以增大切割速度,提高加工效率。在此基础上,导出了光斑重叠度和极限切割速度的计算公式,利用此公式估算的脉冲激光切割的极限速度与实验结果符合很好。

关键词 激光精密切割, 极限切割速度, 光斑重叠度

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

Study of YAG Laser Cutting Process with Stainless Steel Sheet

LI Xiang-you¹ ZENG Xiao-yan¹ LIU Yong¹ XU Wei-tao¹ HUANG Wei-ling²

(¹State Key Laboratory of Laser Technology, ²State Engineering Research Center for Laser Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract In this paper, the experiments of cutting stainless steel sheet with Nd:YAG pulse laser, were carried out. The effects of laser process parameters on kerf width and quality were studied. The results showed that the kerf width increases with the increase of the power density, pulse frequency and pulse width; the cutting speed is increased and the cutting quality is improved with increasing the pulse frequency. Besides, the calculation formulas of the overlapping degree of the neighboring laser pulse and the maximum cutting speed are deduced.

Key words laser precision cutting, maximum cutting speed, overlapping degree

1 引 言

激光切割是近几十年发展起来的高新加工技术之一,在许多加工领域有着传统加工方法所不可比拟的优越性。例如,它可对几乎任何固体材料进行加工,瞬时切除率很高,加工时无工具磨损,且没有机械力的作用,基材热影响区小,加工速度快,加工效率高。尤其是精密加工行业,激光切割各种微小部件以及各种精密的模板,已具有逐步取代传统加工方法的趋势。因此,激光切割技术已开始应用于航空航天、电子、食品、医药、纺织、汽车工业等方面,其市场潜力十分巨大^[1,2]。

不锈钢薄板因其优良的性能而广泛地应用于工业领域。由于其韧性极好,一般的机械加工方法难以将其加工成比较复杂的形状与尺寸,常常需

要借助于传统的照相-化学蚀刻法,后者的加工精度虽然比一般的机械方法高,但加工工序多、周期长,特别是受蚀刻因子的限制,最小的缝隙宽度不能低于板材厚度的 1/2,因而难以满足日益发展的微电子技术对电子线路质量越来越苛刻的要求。激光精密加工方法为不锈钢模板表面加工各种复杂形状图案提供了一条崭新的途径,不仅加工质量及精度大大提高,而且成本也越来越接近于传统的化学蚀刻法。

用于切割的激光源有连续和脉冲两种工作模式。一般来说,连续激光切割可以大大提高加工效率,但对于薄板以及精密加工来说,采用脉冲工作方式,不仅可以显著减小热影响区,而且可以有效提高切缝的表面质量^[3]。

迄今为止,采用 CO₂ 激光连续切割厚板的工艺及其机理国内外已有不少研究及文献报道^[4-6],但对于薄板以及 Nd:YAG 脉冲激光切割机理的研究报道很少^[7]。为此,作者利用 Nd:YAG 激光器对不

* 通信联系人。

锈钢薄板切割工艺及机理进行了探讨,获得了薄板精密切割的一些基本规律。

2 实验方法与设备

加工试样选用 0.2 mm 和 0.4 mm 厚度的不锈钢薄板(1Cr18Ni9Ti 和 1Cr13),规格 260 mm×195 mm 本文除特别注明外,所有图线的加工材料均为 1Cr18Ni9Ti。不锈钢为单面抛光。激光器采用华中科技大学激光公司研制生产的 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。加工采用氧气作为辅助气体,气压约为 0.5 MPa,喷嘴直径约为 φ 1.5 mm。整个加工系统示意图见图 1。

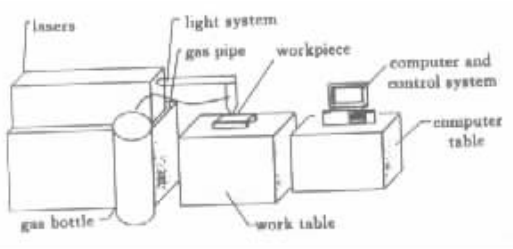


图 1 激光切割系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser cutting system

实验通过改变不同的激光工艺参数来探讨影响切割质量的规律。选用十种不同的速度(2~20 mm/s),在特定参数下利用微机控制其一次加工十条平行的切缝,缝间距为 5 mm,单缝长度为 50 mm。用光学显微镜观察切缝表面形貌并照相。

3 实验结果

3.1 扫描速度和激光功率密度对切割质量的影响

图 2 给出了在不同扫描速度与峰值功率下,激光切缝宽度的变化规律。可以看出,随着功率密度的提高,切缝宽度显著加大,并且所能切透的极限速度也随之增大。从切割质量来看,低功率密度切割时,缝外表面易残留飞溅物,且易附着毛刺,而随着功率密度的提高,这些现象明显减少,切割质量明显提高。由图 2 还可看出,切割速度对切缝宽度的影响并不大(略有下降)。但是当重复频率一定时,速度提高到一定的程度,就会使切缝由平直状态(见图

3(a))变成不连续的小孔(见图 3(b))。换句话说,在一定的重复频率下,脉冲激光切割存在一个极限速度,当速度大于这个极限值时,脉冲激光切割成为激光打孔,即出现不能连续切断的现象。另外,随着速度的提高,表面飞溅物及切缝残留物越来越多,切缝质量也逐渐变差。

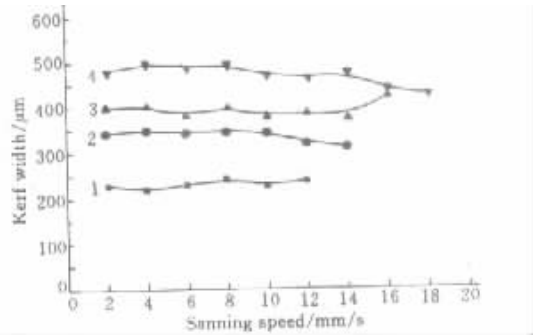


图 2 激光切缝宽度随速度和功率密度的变化

Fig.2 Effect of scanning speed and power density on laser cutting kerf width

thickness : 0.2 mm , pulse width : 0.5 ms , frequency : 45 Hz

1 : 1.4×10⁶ W/cm² ; 2 : 4.2×10⁶ W/cm² ;

3 : 6.6×10⁶ W/cm² ; 4 : 10.1×10⁶ W/cm²

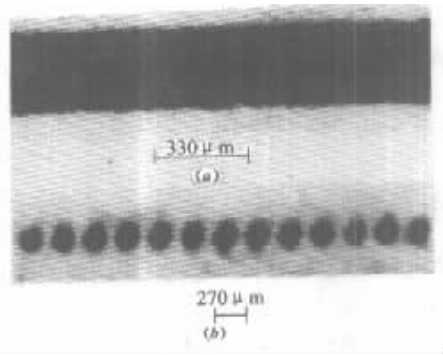


图 3 激光切割金相宏观形貌

Fig.3 Macro Metallography images of laser cutting

(a) 0.4 mm , 6.6×10⁶ W/cm² , 0.2 ms , 100 Hz , 2 mm/s ;

(b) 0.2 mm , 6.6×10⁶ W/cm² , 0.2 ms , 45 Hz , 20 mm/s

3.2 脉宽和重复频率对切割质量的影响

图 4(a)给出了不同脉宽下激光切割缝宽与速度关系曲线。可见,随着脉冲宽度的增加,切缝缝宽加大。图 4(b)给出了不同重复频率下激光切割缝宽随扫描速度的变化规律。可以看出,重复频率对激光切割缝宽的影响较大。随着重复频率的提高,切缝宽度是增加的。

3.3 材料特性对切割质量的影响

图 5(a) 给出了不同材料(1Cr18Ni9Ti 和 1Cr13)的切割缝宽与扫描速度的关系曲线。可以看出,在工艺参数完全相同的条件下,1Cr18Ni9Ti 比 1Cr13 的缝宽要大。

3.4 板材厚度对切割质量的影响

图 5(b) 为不同厚度的不锈钢在相同条件下,切割速度和缝宽的关系曲线。由图可知,随着切割速度的增加,切缝宽度是减小的。其他参数相同的情况下,板材越厚,切缝宽度越大,能连续切割的极限速度越小。

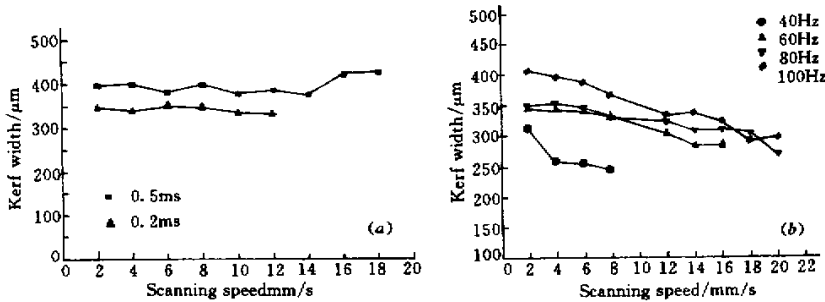


图 4 脉宽(a)和频率(b)不同时激光切割缝宽比较(0.2 mm 厚)

Fig.4 Comparison under various pulse width(a)and under various frequency(b)

(a) frequency : 45 Hz , power density : $6.6 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$; (b) pulse width : 0.2 ms , power density : $5.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$

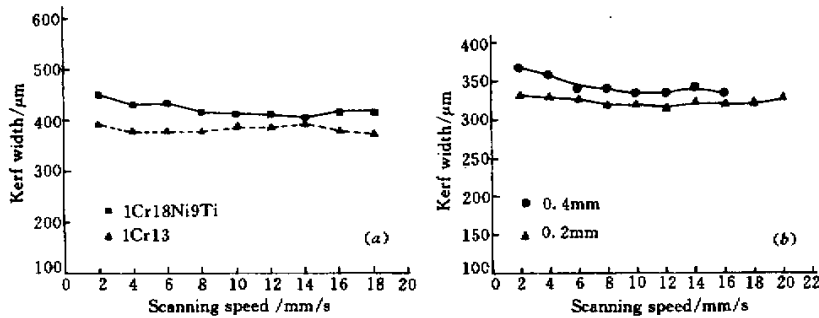


图 5 激光切割不同材料(0.4 mm 厚)(a)和材料厚度不同时(b)缝宽的比较

Fig.5 Comparison under various material(0.4 mm)(a)and under various pulse width(b)

frequency : 100 Hz , pulse width : 0.2 ms , power density : $5.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$

4 分析与讨论

4.1 关于光斑直径

H. Kaebernick 等曾对脉冲激光切割过程提出了一个物理模型^[7],定性地解释了脉冲激光切割中的一些基本物理现象。但该文的内容无法用来解释本文的实验结果。为了讨论问题的方便,我们对文献[7]中的模型稍加改进,如图6所示。对于能量按高斯分布的光斑,光斑直径一般定义为高斯光束强度衰减到中心光强的 $1/e^2$ 时的横向尺寸(如图6中 $2a$ 即激光光斑直径)^[8]。对于脉冲激光来说,在其他条件相同时,输入的激光功率越大,光斑直径也将相应增大。

在理想条件下,假设光斑直径以内区域的激光可以实现材料的切割,而光斑直径以外的区域

不能切除材料,此时,切缝的宽度就等于光斑直径。但在实际激光切割中,由于基材的热传导作用及被

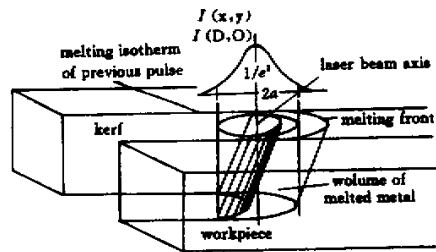


图 6 激光光斑尺寸与切割模型示意图

Fig.6 Schematic image of laser spot size and cutting model

切割材料熔点、沸点、导热性等参数的不同此假设条件只能在很窄的范围内成立。换句话说,在绝大多数情况下,切缝的宽度并不等于光斑直径,它可能大于或小于光斑直径,具体取决于激光器参数、材料特性和加工参数三个方面。

4.1.1 激光器件参数

1) 输入的峰值功率越高,激光光强越大,光斑直径也越大,切缝的宽度会相应增加;

2) 提高重复频率,尽管光斑直径不会变化,但由于在单位时间内作用的脉冲数增多,热积累效应显著,使缝宽增大;

3) 在其他条件相同时,激光脉冲宽度的增加,使激光光斑与被加工对象的热作用时间延长,导致切缝宽度加大。

上述分析可以解释本文 3.1 和 3.2 节的激光器重复频率、脉冲宽度和功率密度对切缝宽度的影响规律。

4.1.2 被加工材料的特性

1) 材料的熔点及沸点越高,则相同条件切除材料所需的能量越多,亦即相同能量下所能切除的材料越少,因此切缝宽度减小;

2) 材料的厚度增加,材料与激光交互作用时间变长,由于热传导的作用,使切缝宽度加大;

3) 材料的导热性影响比较复杂。导热性非常好时,热量瞬时传递出去,热积累效应不显著,而使缝宽减小;导热性很差时,热量不易传走,而使被切割材料熔融区局限于光斑直径范围内,切缝宽度也有限。当材料导热性介于两者之间时,切缝宽度随导热性的增大应该有先增后减的趋势。如本文 3.3 节所述,由于 1Cr18Ni9Ti 的导热性比 1Cr13 要差,因而缝宽要大。

4) 材料对激光束的吸收特性。吸收越好,越有利于有效利用激光束的能量,获得高质量的焊缝。

上述分析可以解释本文 3.3 节中材料厚度和特性对切缝宽度的影响规律。

4.1.3 激光加工参数

1) 扫描速度提高,切割宽度略有减小,这是因为随着扫描速度的提高,激光束与材料交互作用时间变短,实际输入的激光能量减少,使得热传导与扩散效应变小,因而切缝宽度减小。

2) 采用活性辅助气体(如氧气)的切缝宽度比惰性气体要大,这是因为激光切割时通入的氧气在高温下与被加工材料反应放热,有助于材料的熔融和去除。

上述分析可以解释扫描速度对切割质量的影响规律。

4.2 关于极限速度和重叠度

图 7 所示为脉冲激光切割时相邻脉冲切割的原理示意图。脉冲激光切割实际上是大量的激光脉冲以一定的频率重叠“打孔”而得到连续的切缝。因而相邻激光光斑的重叠程度就直接影响激光切割的质量。为了表述问题的方便,我们引入了重叠度的概念,它表示相邻激光光斑重叠的程度,重叠度 α 用式(1)进行定义

$$\alpha = \frac{\delta}{2r_m} \times 100\% \quad (1)$$

式中 δ 为相邻光斑重叠区大小, r_m 代表板材切缝宽度的大小的一半。

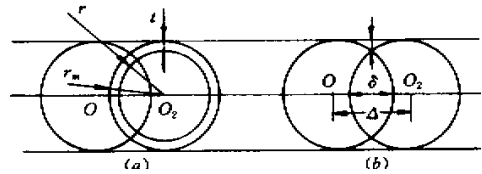


图 7 脉冲激光切割原理示意图

(a) 一个脉冲切割开始 (b) 一个脉冲切割结束

Fig. 7 Schematic diagram of laser pulse cutting processing

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

又因为两激光光斑的中心距 Δ 与切割速度 v 和重复频率 f 的关系为

$$\Delta = v/f \quad (2)$$

而根据图 7,很容易推出下式

$$\delta = 2r_m - \Delta \quad (3)$$

联立(1)~(3)式,得公式(4)

$$\alpha = \left(1 - \frac{v}{2r_m \cdot f}\right) \times 100\% \quad (4)$$

从公式(4)可以看出,当 $0 \leq \alpha \leq 100\%$ 时,脉冲激光切割的切缝为连续的(见图 3(a)),并且越接近 100%,重叠度越大,切缝越平直;当 α 越接近 0 时,切缝锯齿状越明显;当 $\alpha < 0$ 时,表示此时相邻激光脉冲无重叠,激光切缝不连续,成为打孔(见图 3(b))。

由公式(4)还可以进一步讨论激光切割的工艺参数对切缝质量的影响:

1) 重复频率的作用

在作精密切割的时候,为了切割更微小的形状,必须尽可能地减小光斑直径,使切缝宽度减小。由式(4)可知,随着 r_m 减小,切割的重叠度 α 会减小,切割质量会变差。为了保持切割质量的不变,可以减小

切割速度以保证重叠度不变,但这样做显然以降低切割效率为代价。所以对光斑尺寸很小的激光精密切割,必须保证激光器输出有一定的重复频率。

2) 极限速度的限制

从公式(4)还可以看出,当 $\alpha = 0$ 时,两相邻激光光斑相切,达到切割的极限状态,我们定义此时的速度为极限切割速度。很显然,将公式(4)变形取 $\alpha = 0$ 可得极限切割速度的计算公式

$$V_m = 2r_m \cdot f \quad (5)$$

公式(5)表示极限切割速度的大小与切缝宽度及重复频率的大小有关, r_m 和 f 越大, V_m 越大。这与前面的实验结果是吻合的。

5 结 论

脉冲激光切割有着连续激光切割所不同的现象和机理,影响脉冲激光切割的工艺参数相对复杂。

1) 激光功率密度对切割宽度影响最为明显(在光斑直径一定的情况下),随着功率密度的提高,切缝宽度变大,切缝表面质量变好。激光脉冲宽度的提高导致激光作用的时间延长,使切缝宽度加大。

2) 对于薄板切割,激光器重复频率是影响脉冲激光切割质量的关键因素。由于脉冲重复频率的限制,脉冲激光切割存在一个极限切割速度 V_m ,其大小可用公式(5)作近似估算。激光输出频率 f 越高,所允许的切缝宽度 $2r_m$ 越大,极限切割速度越大。在相同速度下,频率提高,可以改善切割质量。

3) 由于脉冲切割是由一系列脉冲叠加而成,因而相邻脉冲的重叠度直接影响了切割的质量。重叠度可用公式(4)进行计算。对于精密激光切割而言,由于允许使用的光斑直径较小,因此要求激光器有较高的重复频率,以确保切割质量与速度。

参 考 文 献

- 1 Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling. Status and prospect of precision laser machining. *Laser Journal* (激光杂志), 2000, 21(5):1~3 (in Chinese)
- 2 Yang Yimin. Applications of precision machining with Nd:YAG laser. *Lasers and infrared* (激光与红外), 1997, 27(6):333~337 (in Chinese)
- 3 Cao Mingcui, Zheng Qiguang, Chen Zutao *et al.*. Laser heat processing. *Press of Huazhong University of Science and Technology*, 1995. 318 (in Chinese)
- 4 Liu Donghua. Laser cutting. *Laser Journal* (激光杂志), 1992, 13(4):207~213 (in Chinese)
- 5 J.-M. Weick, W. Bartel. Laser cutting without oxygen and its benefits for cutting stainless steel. *Proc. 6th Inc. Conf. Lasers in Manufacturing*, Berlin:Springer-Verlag, May, 1989, (5):81~89
- 6 J. Wang, W. C. K. Wong. CO₂ laser cutting of metallic coated sheet steels. *Journal of Material Processing Technology*, 1999, (95):164~168
- 7 H. Kaebnick, D. Bicleanu, M. Brandt. Theoretical and experimental investigation of pulsed laser cutting. *Annals of the CIRP*, 1999, 48(1):163~166
- 8 Yan Yuhe, Zhong Minlin. High power laser machining and applications. Tianjin:Press of Tianjin Science and Technology, 1994. 56 (in Chinese)