

文章编号: 1001-3806(2005)03-0251-04

## 激光切割金属厚板新技术

谢小柱, 李力钧\*, 张屹, 刘继常, 鄢铨  
(湖南大学 激光研究所, 长沙 410082)

摘要: 介绍了激光切割金属厚板的过程, 分析了存在的主要问题及产生的原因, 最后从激光器、聚焦光学系统以及辅助气流的改进等方面介绍了一些激光切割厚板的新技术, 为进一步的研究和工业化应用提供了技术参考。

关键词: 激光切割; 金属厚板; 影响因子; 发展趋势

中图分类号: TG485 文献标识码: A

### Newly developed technique of laser cutting thick metal plates

XIE Xiao-zhu, LI Li-jun, Zhang Yi, Liu Ji-chang, Yan Cuo  
(Institute of Laser Hunan University, Changsha 410082 China)

**Abstract** The process of laser cutting thick metal plates was introduced. The main problems and their causes were analyzed. A series of newly developed thick cutting methods were ultimately recommended with respect to improvements on lasers, focusing system and assisted gas jet which provides the technique references for further research and industrial application.

**Key words** laser cutting thick metal plates; influence factors; development tendency

### 引 言

激光切割是一种应用最广泛的激光加工技术。其工业应用始于 70 年代初, 最初用在硬木板上切非穿透槽, 嵌刀片, 制造冲剪纸箱板的模具。随着激光器件和加工技术的进步, 其应用领域逐步扩大到低碳钢<sup>[1]</sup>、不锈钢等金属<sup>[2]</sup>和木材<sup>[3]</sup>、增强塑料<sup>[4]</sup>、陶瓷<sup>[5]</sup>、石英<sup>[6]</sup>、石材<sup>[7]</sup>等非金属材料切割, 应用规模也不断扩大。激光切割金属薄板具有精度高、适应性强等特点, 在工业上得到了广泛的认可, 然而商业化可行最大切割厚度也只有 15mm。对于切 15mm 以上的厚板, 由于对加工过程动力学机理不清楚, 超过此范围的切割质量非常差。随着切割厚度的增大, 切边条纹 (edge striations) 和挂渣 (dross adhesion) 现象愈发明显, 侧向燃烧 (side burning) 也很严重。一般情况下, 激光切割 10mm 以上的厚板, 切割速度将明显下降, 切口的可重复性也不佳, 无法同传统技术竞争<sup>[8]</sup>。钢结构、压力容器、船舶、桥梁等行业常常使用 12mm 以上钢板, 如果激光能够高效柔性地切割这些金属材料, 无疑将有很大的市场前景, 为此, 国内外学者竞相研究, 探索激光切割厚板的机理和发展新工艺和新技术。

### 1 厚板激光切割过程和存在的问题

#### 1.1 切割过程

激光切割厚板时, 仅靠激光器本身提供的能量不足以切透工件, 因此采用有氧切割是必要的。反应熔化切割时, 氧气与工件材料发生铁氧放热反应, 为氧气辅助激光切割提供大部分的能量, 吹走熔化物和冷却工件表面。气流与光轴同轴, 其中一部分气流进入切口, 进入切口的气流又有一部分被切割前沿所反射, 另一部分气流能进入切割前沿的熔化层。熔化层存在 3 种质点: 氧原子、金属原子和反应产物的原子。在稳定的切割过程中, 这 3 种质点处于一种稳定的平衡状态: 熔化层从气流得到氧原子, 氧化物的分解也产生氧原子, 熔化物的氧原子通过氧化反应从熔化层表面蒸发和随熔融材料从切口下部喷出而散失; 熔融金属原子来自固体材料, 随切割运动而熔化并伴随氧化物的分解, 也通过切割前沿表面的蒸发、氧化反应和随熔融材料从切口下部喷出而散失。计算结果表明, 铁氧反应中熔化金属完全燃烧是合理的。反应氧化切割钢板时, 约有 60% 的能量来自铁的氧化反应。而反应氧化切割钛合金板时, 放热反应可提供 90% 的能量<sup>[9]</sup>。

#### 1.2 存在的问题

实际切割过程中, 能切透的板厚是有限的, 这与切割前沿铁不能稳定燃烧密切相关。目前激光切割厚板存在的主要问题有切割速度低、切口质量差 (挂渣和侧向燃烧), 引起这些问题的原因有以下几点。

作者简介: 谢小柱 (1975-), 男, 博士研究生, 现从事激光切割、激光烧蚀方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: lijunl@hotmail.com

收稿日期: 2004-06-08 收到修改稿日期: 2004-07-27

(1)热损失大。切割速度的降低,切割区域的热损失增加。热损失的主要形式是热传导,厚度越大,热传导损失越大,切割速度也越低。切口底部材料的去除变得不一致。虽然激光穿透了厚板,大量的熔渣粘结在底部。挂渣形成的原因是切口底部的平均切割温度很低造成的,温度低又是因为能量损失大的缘故<sup>[10]</sup>,经常为了去除挂渣,需要再切一刀,这种情况下的切口质量通常不高。

(2)避免侧向燃烧。ILAVARASAN<sup>[11]</sup>等在研究激光切割厚板时切割前沿的气流特性时发现:当切割区域周围温度高到可以在氧气中燃烧时,就会发生氧化反应。通常侧向燃烧发生在切口的顶部,为防治侧向燃烧需要降低氧气的压力。材料越厚可供选择的氧气压力范围就越窄,只有 7kPa 而薄板切割范围有 21kPa~ 35kPa。这就削弱了切口底部氧化反应,降低了熔融物去除的能力。

(3)氧气的纯度。氧化反应激光切割时,氧气起了非常重要的作用。激光入射到工件表面形成小孔,当激光束沿着切割方向移动时,小孔周围有氧化熔化物。氧气的纯度对激光切割有很大的影响,含杂质多的氧气就不能提供足够的能量到切口底部形成高流动性的熔化物,因而降低了切割质量和切割速度。O'NEILL<sup>[8]</sup>等研究了 CO<sub>2</sub> 激光切割钢板时氧气的特性,重点分析了切口处质量转移效应。测量不同切口位置的氧气纯度,发现切口越深,氧气纯度就越低,铁氧反应就很难维持,因此保证氧气纯度是很重要的。

(4)几何形状的差异。激光切割厚板时,熔化前沿的倾角变得突出了,这将导致材料对激光吸收系数的降低,进而降低了切割速度。

(5)焦深大小。激光切割厚板时,焦点在工件表面以下,焦深必须很大,足以维持在切深内有较高的激光功率密度,这就对激光的模式提出了更高的要求,也为激光高速切割厚板带来了很大的难度。

## 2 厚板激光切割技术

激光切割厚板时,切割速度低、易底部挂渣和侧向燃烧,这些都是困扰这些技术应用的主要障碍。扩大激光切割厚板的范围也是研究目的之一。如何用更小的激光功率切割更厚的板材也是最近研究的热点。为此,众多学者探索新技术和新工艺来解决这些问题,其主要思路都侧重于激光器、聚焦光学系统以及辅助气流的改进等方面,下面将从这 3 方面分别介绍这些新方法和新技术。

### 2.1 激光器

2.1.1 提高激光器功率 研制更大功率激光器是提高切割深度的最直接的方法。近年来, HULL 和 LAN-

DER 等<sup>[12]</sup>使用 100kW CO<sub>2</sub> 激光器切割 50 8mm 厚钢板。当功率密度达到 60kW /cm<sup>2</sup> 时,试件以 400 05 mm /m in 速度被切穿,如图 1 所示。当功率密度达到 30kW /cm<sup>2</sup> 时,试件以 228 6mm /m in 速度被切穿。与其它切割方式相比,激光切割对环境污染小。

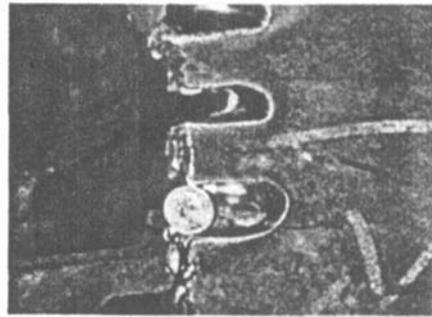


图 1 100kW CO<sub>2</sub> 激光器切割 50 8mm 结构钢的正视图

激光切割金属材料时,材料对激光吸收率低和产生等离子体是阻碍切更厚工件的重要原因,将两台激光器功率耦合在一起,可以增大吸收率和减小等离子体的产生,有助于切厚板。为此, MOLIAN 等<sup>[13]</sup>采用两台 1.5kW CO<sub>2</sub> 激光器双光束切割钢板和超耐热合金,其加工示意图如图 2 所示,切割过程如下:第 1 束

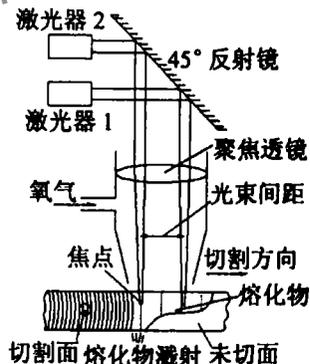


图 2 双光束 CO<sub>2</sub> 激光切割法示意图

激光部分穿入移动工件,使部分区域的材料加热至熔化和气化,在工件上形成盲孔。当第 2 束激光入射到第 1 束激光加热的熔化区时,将材料加热至汽化并使其余的熔融材料过热。伴随氧化反应提供的热量,第 2 束激光能够穿透熔化物,因而使得熔化物飞溅。与单一激光束相比,双光束激光切割厚度和切割速度都更大,切割质量也很理想。基于线热源激光的热传导模型,建立起切割厚度、切割速度同两激光束之间距离的函数关系。对于低碳钢,切割厚度为 6.35mm ~ 19mm,则切割速度为 254mm /m in ~ 2286mm /m in;对于超耐热合金,切割厚度为 6.35mm ~ 15.875mm,则切割速度为 508mm /m in ~ 1524mm /m in。

2.1.2 脉冲方式加工 脉冲激光具有很高的峰值功率,可以直接穿透厚板。使用高频率、窄脉宽的脉冲激光切割可以在不增加激光功率的情况下实现厚板的切割,其切口尺寸较连续激光要小些。JONES 和 CHEN 等<sup>[14]</sup>使用二极管抽运 Nd:YAG 激光器切割厚不锈钢、

铬镍铁合金和大颗粒钛金属。脉冲功率 2kW, 频率 40Hz。切口宽度和 EDM 切割的相似, 激光切割 304L 不锈钢和铬镍铁合金 600 时, 切割厚度 12.7mm ~ 38.1mm, 切割速度分别为 0.102mm/s ~ 9.73mm/s (304L 不锈钢) 和 0.102mm/s ~ 6.77mm/s (Inconel 600)。

Nd:YAG 激光切割的一个突出优点是输出激光易于光纤传输。正是因为如此, 适合 Nd:YAG 激光切割场合更加广泛, 比如在车间外面、不能触及的建筑物部位、灾难现场和水下现场等。WATANABE 等<sup>[15]</sup> 用 3.8kW 光纤传输的 Nd:YAG 激光器切割厚钢板。试件为 50mm 低碳钢 SS400 和不锈钢 SUS304 辅助气体为氧气、氮气和干燥空气, 试验结果总结如下: (1) 若辅助气体为氧气, 下面的切口宽度比上面的要宽, 这是由于材料自燃的缘故; 若辅助气体为干燥空气, 上下切口宽度基本一致; (2) 切割速度越大, 切口宽度越小; (3) 若辅助气体为氧气, 低碳钢和不锈钢的最大切割速度分别为 200mm/min 和 50mm/min。

2.1.3 使用新型激光器 目前工业化用于切割的主流激光器是 CO<sub>2</sub> 和 Nd:YAG 激光器, 其良好的性价比占据了主要的切割市场, 尤其是中低功率的激光器。COIL 激光器是 1977 年在菲利普斯实验室由 MCDERMOTT 等人<sup>[16]</sup> 首先研制出来的, 它是目前为止具有最短波长 (1.315μm) 的大功率化学激光器, 输出为红外激光, 适合光纤传输, 功率密度很高, ATSUTA<sup>[17]</sup> 测得 1kW COIL 激光器的功率密度可以达到 1.4MW/cm<sup>2</sup>。通过切割 5mm 不锈钢试验表明, 1kW COIL 激光器的切割能力与 Nd:YAG 激光器相当, 是 CO<sub>2</sub> 激光的 2.5 倍。由于输出波长短, 有利于材料吸收能量, 适合加工厚钢板和高反射的铝、铜板, 因而在大功率切割厚板具有很好的工业化应用前景。

KAR 等<sup>[18]</sup> 在美国空军菲利普斯实验室采用 10kW COIL 激光器切割厚不锈钢试验, 如图 3 所示, 建

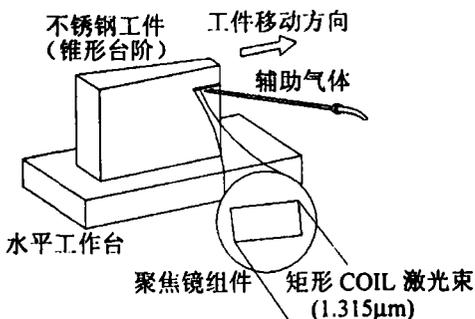


图 3 COIL 激光器切割厚板示意图

立了基于集中参数方法的数学模型, 得出了切割深度和各种参数之间的相互关系。讨论了激光功率、光斑直径和切割速度等参数对切割深度的影响。根据数学模型预测 COIL 激光器高速切割厚不锈钢的可能性。切割试件为不锈钢 40Q 切割厚度 20mm ~ 27mm, 功率

3.6kW ~ 7.2kW, 矩形喷嘴最小尺寸为 0.6mm × 2.5mm, 辅助气体为氦气 (压力 1400kPa) 和氮气 (压力 1000kPa), 切割速度 0.12m/min ~ 0.3m/min。近来 CARROLL<sup>[19]</sup> 报道了 5kW ~ 6kW COIL 激光器切割 A36 低碳钢, 最大切割厚度可达 100mm, 切割速度为 0.12m/min ~ 1.0m/min。氧气辅助切割质量逊于氮气辅助切割。铝板切割深度可达 41mm, 切割速度为 0.03m/min ~ 1.50m/min。

## 2.2 光学系统

2.2.1 自适应光学系统 GEIGER 等<sup>[20]</sup> 使用自适应光学系统激光切割 16mm 的低碳钢, 如图 4 所示。与

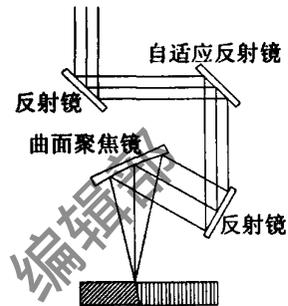


图 4 自适应光学系统激光切割法示意图

传统激光切割技术不同之处在于无需将焦点位置放在切割表面以下, 焦点位置沿着材料厚度方向上下波动几个毫米, 焦点位置的偏移导致自适应光学系统中焦距的改变。焦距的周期性变化与激光和工件之间相对运动的重合导致焦点位置沿着工件深度成正弦函数变化。焦点位置的周期性变化影响切割过程, 可以得到高质量和高性能的切口, 这种方法的缺点是切割深度有限, 一般不超过 30mm。

2.2.2 双聚焦法 另一个解决办法是采用双焦点法。双聚焦法<sup>[21]</sup> 是采用特殊的透镜使光束在不同部位两次聚焦, 切割装置如图 5 所示。图中  $D_1$  为透镜中心部分的直径,  $D_2$  为透镜边缘部分的直径。透镜中心的曲率半径比周围大, 形成了双焦点。实际切割时, 一般根据板厚来选择透镜。切割过程中, 上焦点位于工件上表面, 下焦点位于工件下表面附近, 见图 5。这种特殊的“双焦点激光切割”技术具有很多优点。对于切割碳钢和软钢来说, 它能在金属的上表面保持高强度的

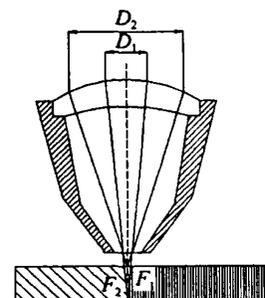


图 5 双聚焦切割法示意图

激光束,以产生材料起燃所需的条件,以及在金属下表面附近保持高强度的激光束,以能满足在整个材料厚度范围内产生干净切口的需要。这一技术拓宽了实施高质量切割的参量范围。例如,采用 3kW 的 CO<sub>2</sub> 激光器普通切割厚度只达到 15mm~20mm,而运用新切割技术切割厚度能达到 30mm~40mm。

### 2.3 辅助气流

GABZDYL 等<sup>[22]</sup>的试验表明辅助气体的纯度极大地影响切割效率甚至切割质量。POWELL 等<sup>[8]</sup>也研究了氧气纯度对激光切割低碳钢的影响,详尽的试验表明,氧气纯度很小的变化都会引起切割进程的显著变化。O'NEILL 和 STEEN<sup>[23]</sup>采用三维模型分析了激光切割中气流携带能力,研究了 1.5mm 直径圆孔喷嘴出口紊流气体与模拟切口相互作用的情况,建立了气体纯度对于切口宽度和深度的作用函数,给出了给定切口宽度和深度组合下可供选择的气体纯度的范围,并使用环形喷嘴 CO<sub>2</sub> 激光切割试验验证理论分析的正确性。

合理设计喷嘴,改善气流流场特征。超音速喷嘴内壁直径先收缩后放大,就可以在出口处产生超音速气流,其供气压力可以很大但不产生激波<sup>[24]</sup>。超音速气流速度很大可以将切缝中的熔化金属快速吹走,提高了切割速度。利用超音速喷嘴进行激光切割时,切割质量也很理想,由于超音速喷嘴在工件表面的切割压力比较稳定,因此特别适用于厚板切割。

### 3 结 论

(1) 由于船舶、核技术和重型机械对金属厚板的需求增大,推动了激光切割厚板技术的发展,但是离工业化应用还有一段距离,仍需进一步研究。

(2) 激光切割厚板的主要方式是氧化反应切割。氧化反应提供大量的热量,是激光切割厚板重要能量。

(3) 激光切割厚板存在的主要问题有切割速度低、易挂渣和过烧。提高激光器功率、发展自适应光学系统,提高辅助气流压力,维持氧气纯度是提高切割深度和切割速度、改善切割质量的有效途径。

#### 参 考 文 献

[1] BELIC I STANIC J A method to determine the parameters of laser iron and steel cutting [J]. *Opt & Laser Technol* 1987, 19(6): 309~311  
 [2] ARATA Y, MARUO H, MIYAMOTO I *et al* Improvement of cut quality in laser gas cutting stainless steel [A]. *Proc 1<sup>st</sup> Int Laser Proceeding Conf [C]*. Anaheim: Laser Institute of America, 1981. 16~17.

[3] MCMILLIN C W, HARRY J E. Laser machining southern pine [J]. *Forest Products Journal* 1971, 21(10): 34~37  
 [4] CAPRINO G, TAGLIAFERRI V. Maximum cutting speed in laser cutting of fibre reinforced plastics [J]. *Int J Mach Tools Manuf* 1988, 28(4): 389~398  
 [5] BLACK I CHUA K L. CO<sub>2</sub> laser cutting of thick ceramic tile [J]. *Opt & Laser Technol* 1997, 29(4): 193~205  
 [6] 周 岩, 刘晓胜, 陈向阳 *et al* 石英晶体激光切割参数建模 [J]. *激光技术*, 2000, 24(2): 74~78  
 [7] BOUTINGUZA M, POU J LUSQUINOS F *et al* CO<sub>2</sub> laser cutting of slate [J]. *Opt & Lasers in Engng* 2002, 37: 15~25  
 [8] O'NEILL W, GABZDYL J T, STEEN W M. Dynamical behaviour of gas jets in laser cutting [J]. *CALEO'92* 1992, 25~29: 449~458  
 [9] 李力钧. 现代激光加工及其装备 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993. 168~169  
 [10] POWELL J. CO<sub>2</sub> laser cutting [M]. London: Springer-Verlag, 1992. 30~31  
 [11] IIAVARASAN P M, MOLIAN P A. Laser cutting of thick sectioned steels using gas flow impingement on the erosion front [J]. *Journal of Laser Applications* 1995, 7(4): 199~209  
 [12] HULL R J LANDER M L, ERIC J J. Experiments in laser cutting of thick steel sections using a 100kW CO<sub>2</sub> laser [J]. *CALEO'2000* 2000 B89: 78~86  
 [13] MOLIAN P A. Dual-beam CO<sub>2</sub> laser cutting of thick metallic materials [J]. *J Mater Sci* 1993, 28(7): 1738~1748  
 [14] JONES M, CHEN X L. Thick section cutting with a high brightness solid state laser [J]. *CALEO'99*, 1999 A87: 158~165  
 [15] TAKEHARU W, HIRAYUKI K, KEIJI S *et al*. Cutting of thick steel with fiber delivered high power Nd:YAG laser beam [J]. *Proc SPIE* 2000 3888: 635~642  
 [16] MCDERMOTT W E, PHELKN N R, BENARD D J *et al*. An electronic transition chemical laser [J]. *A P L*, 1978, 32: 469~470  
 [17] ATSUTA T, YASUDA K, MATSUMOTO T *et al*. CO<sub>2</sub> and thermal material processing [J]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)'94*, 1994. 8: 351.  
 [18] KAR A, SCOTT J E, LATHAM W P. Theoretical and experimental studies of thick-section cutting with a chemical oxygen-iodine laser (COIL) [J]. *Journal of Laser Applications* 1996, 8(3): 125~133  
 [19] CARROLL L, ROTHENFLUE J A. Experimental study of cutting thick aluminum and steel with a chemical oxygen-iodine laser using an N<sub>2</sub> or O<sub>2</sub> gas assist [J]. *SPIE*, 1997. 3092: 758~763  
 [20] GEGER M, SCHUBERTH S, HUTFLESS J. CO<sub>2</sub> laser beam sawing of thick sheet metal with adaptive optics [J]. *Welding in the World* 1996, 37(1): 5~11.  
 [21] NIELSEN S E, ELLIS N. Dual-focus laser cutting [J]. *Welding in the World* 2002, 46(3~4): 33~40.  
 [22] GABZDYL J T, MORGAN D A. Assist gases for laser cutting of steels [J]. *CALEO'92* 1992, 25~29: 443~447.  
 [23] O'NEILL W, STEEN W M. Three dimensional analysis of gas entrainment operating during the laser-cutting process [J]. *J Phys* 1995 D28(1): 12~18  
 [24] MAN H C, DUAN J YUE T M. Design and characteristic analysis of supersonic nozzles for high gas pressure laser cutting [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 63(1~3): 217~222.