

6 mm 碳钢板的激光切割性能

徐国建¹ 李宏利^{1*} 杭争翔¹ 刘祥宇² 杳名宗春³

¹沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870

²鞍山煜宸科技有限公司, 辽宁 鞍山 114044

³最新激光技术研究中心, 日本爱知县 安城市 4460026

摘要 采用2.0 kW六轴机器人光纤激光切割系统,研究了切割工艺参数对厚度6 mm的碳钢板的切口宽度、切口倾斜角度、切口表面粗糙度及切口微观状态的影响规律。研究表明,该系统的最佳切割工艺参数为切割速度约2.0 m/min、辅助气体压力14.7 N/cm²、聚焦镜焦距 $f=200$ mm、激光光斑直径0.3 mm、离焦量范围+4~+5 mm、切割喷嘴直径0.8 mm。在最佳切割工艺参数下,切口宽度0.5~0.6 mm,切口倾斜角度0.2°~0.5°,切口表面挂渣很少,切割时切面的顶部和底部呈现不同的平整度而分成两个不同的部分,底部温度较高,氧化速度领先切割速度的差距大于顶部,所以平整度较差。与CO₂激光切割相比,光纤激光切割的切口表面粗糙度略小,切割功率效率提高2.6倍。

关键词 光纤激光; 切割速度; 辅助气体压力; 离焦量

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.040601

Performance of 6 mm Mild Steel Sheet Laser Cutting

Xu Guojian¹ Li Hongli¹ Hang Zhengxiang¹ Liu Xiangyu² Kutsuan Muneharu³

¹School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology,
Shenyang, Liaoning 110870, China

²Anshan Raycham Technology Co.,Ltd., Anshan, Liaoning 114044, China

³Advanced Laser Technology Research Center Co., Ltd., Anjo-shi, Aichi-ken 4460026, Japan

Abstract A 2.0 kW six-axis robot fiber laser cutting system is used to study the impact of cutting process parameters on the kerf width, bevel angle, cutting surface roughness and incision microscopic state of 6 mm thick steel plate. The results show that the optimum cutting process parameters are cutting speed about 2.0 m/min, auxiliary gas pressure 14.7 N/cm², focusing lens focal length $f=200$ mm, laser spot diameter 0.3 mm, defocusing amount +4~+5 mm, cutting nozzles diameter 0.8 mm. Under the optimum cutting process parameters, the kerf width is 0.5~0.6 mm, the cutting tilt angle is 0.2°~0.5° and the cutting surface roughness is small. Cutting surface is divided into two different parts because of the top and bottom sections show different flatness. The temperature in the bottom is higher, the gap between oxidation rate and cutting rate is greater than that on the top, so the flatness is poor. Compared with CO₂ laser cutting, fiber laser cutting surface roughness is better and the cutting power efficiency is increased by 2.6 times.

Key words fiber laser; cutting speed; auxiliary gas pressure; defocusing amount

OCIS codes 060.3510; 160.3900; 140.3390

1 引言

传统的切割方法速度慢,效率低,精度差,污染严重。作为第四代激光器的代表,光纤激光器的发展越来越迅速。光纤激光器具有光束质量好、转换效率高、产量高、结构简单、维护方便、耗材少、体积小、重量轻、稳定性好、长期运行成本低等特点。将光纤激光器用在材料加工方面的研究正在逐渐增多^[1-2]。激光切

收稿日期: 2013-11-07; 收到修改稿日期: 2013-11-14; 网络出版日期: 2014-03-11

基金项目: 2013年沈阳市科学技术计划(F13-319-6-03)

作者简介: 徐国建(1959—),男,博士,教授,主要从事激光加工工艺及成套加工设备等方面的研究。

E-mail: xuguojian1959@hotmail.com

* 通信联系人。E-mail: 874519129@qq.com

割是激光加工行业最重要的一种技术,占整个激光加工行业产值的70%以上^[3]。激光切割技术在国外已经相当成熟,由于其特有的优异加工性能而被广泛应用,德国、美国等西方工业化国家和先进的发展中国家均致力于这项技术的研究和应用^[4-6]。目前,国内激光切割应用范围正在不断扩大,已达几十个领域。其中最具有代表性、应用最为广阔的是汽车制造业。据估计,约有60%的汽车零部件可以通过激光切割来提高质量。

近年来,高功率光纤激光器在切割领域的研发和应用得到广泛关注^[7]。而且激光切割对切割材料没有要求,金属非金属均可实现切割,切割速度也高于传统切割方法^[8]。在进行厚板切割时,不仅要考虑切割质量还要考虑切割速度。切割质量可以用被切部件的尺寸精度、切割后的变形量、切割面顶部和底部表面粗糙度及切面挂渣厚度等来描述。这几个衡量标准是由零件的材质和形状、机械加工精度、激光束特性以及由激光器、气体喷嘴、光束扫描方式组成的激光加工光学系统等切割条件确定的。

本研究主要是利用机器人切割系统研究切割参数对切割质量的影响规律,为机器人三维离线编程切割奠定基础。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

实验材料选用SS400钢。板材规格为200 mm×50 mm×6 mm。实验板材的化学成分如表1所示。

表1 实验材料化学成分

Table 1 Chemical composition of the experimental material

Element	C	Si	Mn	S	P	Fe
Mass fraction /%	0.21	0.10	0.59	0.006	0.0019	Bal.

2.2 实验方法

利用IPG 2.0 kW 光纤激光切割机器人系统调节不同参数对6 mm厚的SS400碳钢板进行切割,对切割后的试件进行研究,分析了切口宽度、切口倾斜角度、切口挂渣以及切口微观状态。试件尺寸如图1所示,实验切缝长度为100 mm,距离切缝起始点和终止点10 mm处是切口横断面观察部位,切缝中间80 mm为切口表面质量分析样件。对试样横断面进行抛光,然后使用NIKON的轮廓投影仪对切口的宽度和倾斜角度进行测量。采用OLYMPUS公司的OLS3000激光扫描显微镜对切割表面的粗糙度进行分析。

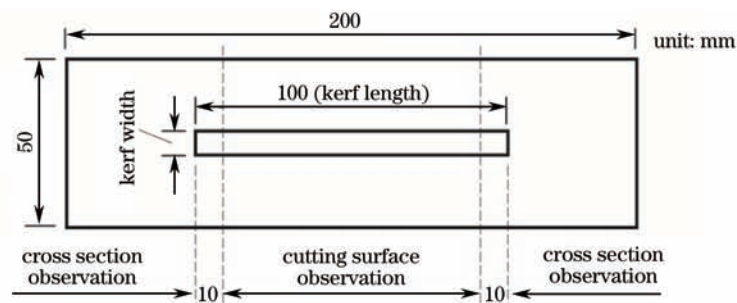


图1 切割试件尺寸示意图

Fig.1 Diagram of cutting specimen size

2.3 实验设备

本研究采用IPG 2.0 kW 光纤激光器、OTC六轴机器人、自制激光切割头等组成的机器人激光切割系统。工作光纤直径为150 μm,准直镜焦长为100 mm,聚焦镜焦长为200 mm,交点处的光斑直径为0.3 mm。IPG 2.0 kW 光纤激光器及自制激光切割头如图2所示。

3 实验结果与讨论

3.1 切割速度对切割性能的影响

利用2.0 kW 光纤激光器和六轴联动机器人组成的机器人激光切割系统对6 mm厚的碳钢板进行切割,在辅助气体压力为19.8 N/cm²,切割速度分别为1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 m/min时进行实验。切割速度对切缝外

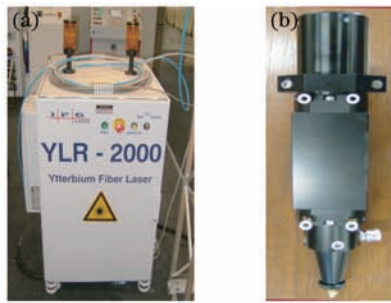


图2 (a) IPG 2.0 kW 光纤激光器和(b)切割头

Fig.2 (a) IPG 2.0 kW fiber laser and (b) cutting head

观质量的影响如图 3 所示。

根据实验结果可以发现,切割速度 1.5 m/min 时,切口较宽,背面有少许挂渣;切割速度 2.0 m/min 时,切割质量较好。切割速度在 3.0 m/min 和 3.5 m/min 时,背面挂渣严重或切不透。在切割功率一定,切割速度较慢时,激光能量较大,导致熔化金属量增加,切口会较宽,如果辅助气体未能将全部熔化金属吹落,在切缝背面会存留未被吹落的金属而形成挂渣;而若切割速度过快,激光能量会变小,当激光能量过小时,激光热量不足以将整个钢板都完全熔透,造成挂渣严重或切不透现象。据观察,速度为 2.0 m/min 时的切割质量较为理想。

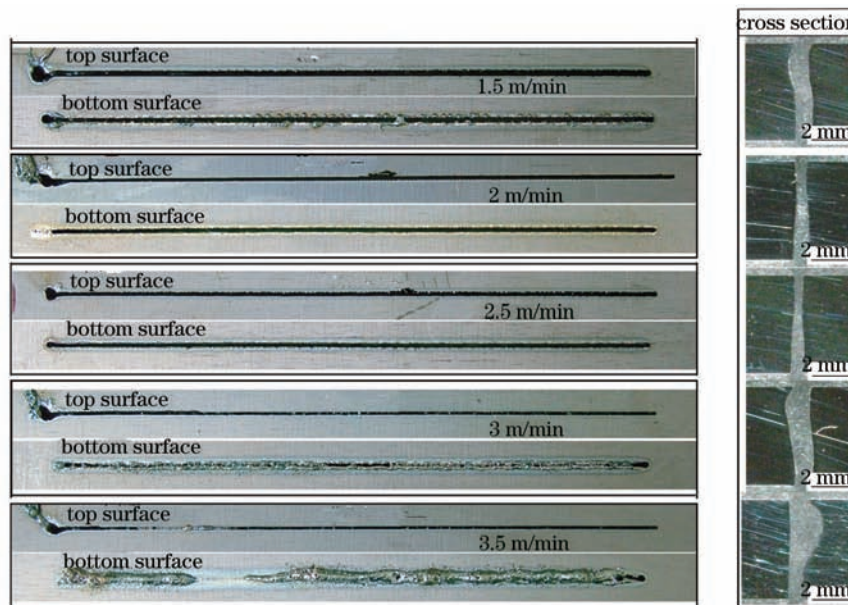


图3 切割速度对切缝外观质量的影响

Fig.3 Effect of cutting speed on the quality of the kerf

3.2 辅助气体压力对切割性能的影响

碳钢切割过程中辅助气体选用氧气,氧气起助燃和吹出熔渣的作用。氧气做辅助气体会产生放热反应,使钢板加热,区域温度很快达到熔点。熔化的金属被吹出去,与母材脱落分离,最终形成一个带有氧化膜的切割表面^[9]。

分析辅助气体压力对切割质量的影响时选取切割速度为 2.0 m/min,辅助气体压力 4.9, 9.8, 14.7, ..., 49 N/cm² 进行实验。对实验数据进行整理,如图 4 所示。辅助气体压力在 4.9~19.6 N/cm² 范围时,切口宽度较窄,并且辅助气体压力在该范围内切口宽度变化不明显,切口倾斜角度在辅助气体压力为 14.7 N/cm² 时得到了最小值,即上下切口宽度更接近。当辅助气体压力大于 19.6 N/cm² 时,切口宽度明显变大。由于随着切割辅助气体(O₂)压力的增大,自由燃烧 O₂ 的数量和覆盖面积增大,导致被氧化和熔化的金属区域增加,有更多的金属被熔化吹掉,于是在一定范围内切口倾斜角度 θ 、切口最大宽度处至试件表面距离 H_m 、切口最大宽度 W_m 及切口平均宽度 W 随着 O₂ 压力的增加而增加。当辅助气体压力为 14.7 N/cm² 时,被熔化的金属恰好

大都被气体吹走,形成的切口上、下表面宽度相差不大,切割断面光滑,切割质量较好。

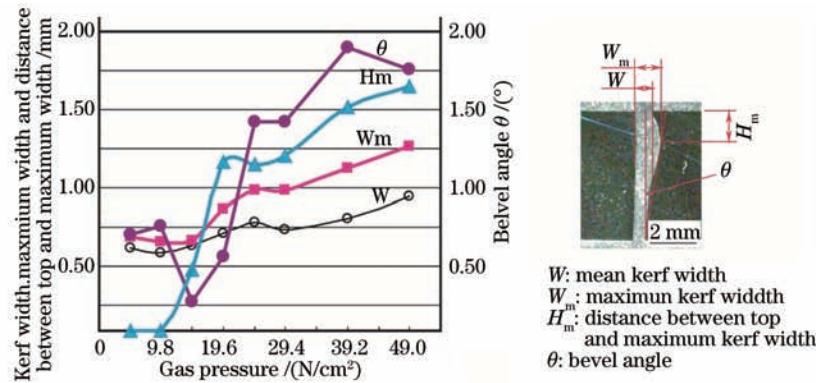


图4 辅助气体压力对切口质量的影响

Fig.4 Effect of auxiliary gas pressure on the quality of cutting

图5是辅助气体压力对试件上、下表面粗糙度的影响曲线。当辅助气体压力在4.9~29.4 N/cm²范围内时,上下表面的粗糙度几乎没有变化,挂渣较少,为60~75 μm之间。当辅助气体压力大于29.4 N/cm²时,随着气体压力的增加,表面挂渣增加,因为气体压力的增加使更多的金属被熔化,形成较宽的切口,在喷嘴直径一定的情况下辅助气体不能将较宽切口上的熔化金属完全吹落,反而挂渣会严重。

在激光切割过程中,由于氧化速度大于切割速度会在切口形成条纹,且氧化速度和切割速度之间的差距越大,条纹越粗且深度越大,条纹间距也增大。在利用光纤激光切割碳钢板的过程中,熔化的金属和氧化物会自上而下被气体吹落,但不能完全被吹掉,在试件底部会有少量熔化金属的堆积而造成热量的堆积,底部温度会高于顶部温度,其氧化速度领先切割速度的差距也大于顶部,底部产生条纹的深度和间距也会大于顶部,切口会形成大条纹的底部区域、小条纹的顶部区域和两者之间的过渡区域,如图6所示。

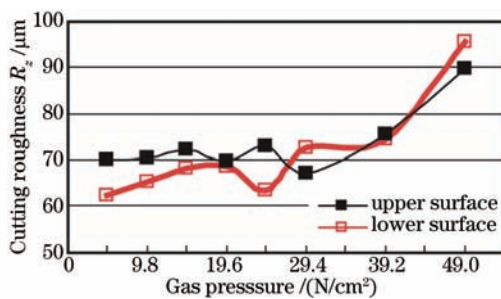


图5 辅助气体压力对表面粗糙度的影响

Fig.5 Effect of auxiliary gas pressure on the surface roughness

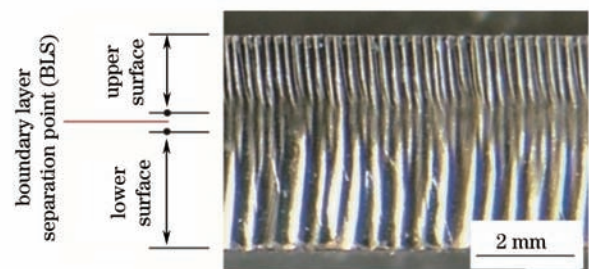


图6 切口微观状态照片

Fig.6 Image of incision microstates

3.3 离焦量对切割性能的影响

离焦量对切割断面表面宽度、断面背面宽度及断面宽度最小处变化规律的影响如图7所示。如图可知,切割采用负离焦时,断面正、背面宽度均较大。由于负离焦时焦点位置在基材表面以下,根据激光光束的特点,切割断口的正、背面加热氧化面积均较大,导致正、背面切口宽度较大。虽然离焦量在-1~+2 mm时断面正面由于加热面积变小而宽度变窄,但是断口的背面宽度仍然较宽,断面正、背面宽度相差较大,切割断面倾斜角度较大。当离焦量大于+2 mm时,切口背面宽度逐渐减小,虽然正面宽度略有增加,但是切割断面正、背面宽度趋于接近。这是由于在离焦量大于+2 mm时,激光束在正面的加热面积和O₂的覆盖面积增大,导致断面正面宽度变大。断面背面虽然受激光束覆盖面积更大,但是光束能量密度降低,且一部分能量被已熔化金属吸收,进一步减小了光束能量密度,断面背面宽度反而会变小。当离焦量为+4~+5 mm时,断面正、背面切口宽度及切口宽度最小处的宽度之间的差别最小,为理想的离焦量。

离焦量对切口倾斜角度的影响如图8所示。由图可知,当离焦量为+3 mm时,倾斜角度较大;当离焦量在+4~+5 mm之间时,切口倾斜角度很小,趋近于0°,即此时的表面切口宽度、背面的切口宽度及切口宽度最小处的值基本是一致的,切口质量较好。这一结果与上述结果是相吻合的。

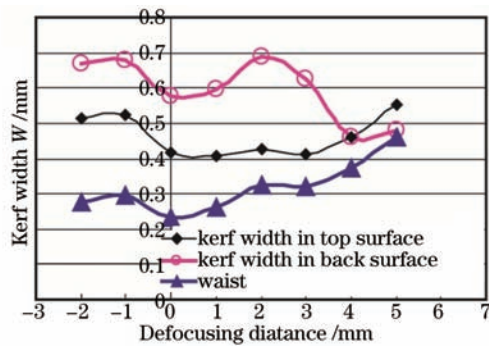


图7 离焦量对切割宽度的影响

Fig.7 Effect of defocusing distance on to kerf width

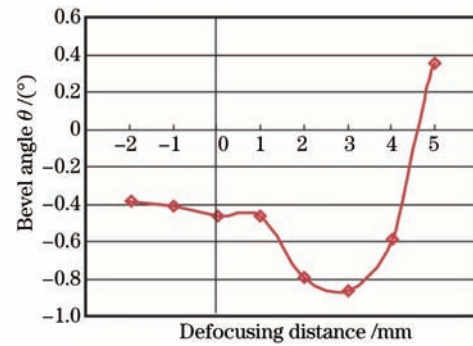


图8 离焦量对切面倾斜角度的影响

Fig.8 Effect of defocusing distance on bevel angle

图9所示为在最佳工艺参数下光纤激光切割6 mm厚碳钢板切口断面照片。

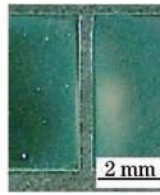
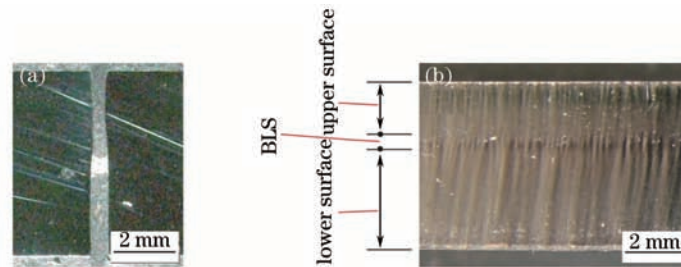


图9 切口断面照片

Fig.9 Image of cutting section

采用CO₂激光切割系统对厚度6 mm碳钢板进行切割实验,最佳切割工艺参数为切割功率2.0 kW,切割速度约2.2 m/min、辅助气体压力约7.8 N/cm²、聚焦透镜焦距 $f=7.5$ inch(1 inch=2.54 cm)、离焦量+1 mm、切割喷嘴直径0.8 mm、喷嘴距工件表面距离1 mm。在上述参数下切割断口和切口微观状态如图10所示。

图10 CO₂激光切割试件照片。(a) 切割断口;(b) 切口微观状态Fig.10 Photos of specimen with CO₂ laser cutting system. (a) Cutting section; (b) incision microstates

用CO₂激光切割系统对厚度6 mm碳钢板进行切割实验,最佳切割工艺参数下切口宽度为0.5~0.6 mm、切口倾斜角度0.2°~0.5°、切口表面粗糙度70~75 μm 。光纤激光切割系统与之相比切口表面粗糙度略小,断口切割质量更好。考虑激光器的光电转化效率等因素,单位时间(1 h)内光纤激光切割系统输出2.0 kW的激光器用电量7.6 kW·h,电光转换效率26.3%,水冷机用电量4.4 kW·h,总效率16.7%;CO₂激光切割系统输出2.0 kW的激光器用电量22 kW·h,电光转换效率9.1%,水冷机用电量21 kW·h,总效率4.7%。与CO₂激光切割系统相比光纤切割系统的切割功率效率提高了2.6倍。

4 结 论

1) 利用光纤激光切割系统对 $t=6$ mm的低碳钢钢板进行切割时,最佳的切割参数是:光纤激光器的功率2.0 kW,切割速度2.0 m/min,辅助气体压力14.7 N/cm²,离焦量+4~+5 mm。此时的喷嘴直径0.8 mm,激光光斑直径0.3 mm,穿孔时间为0.1s,聚光透镜焦距 $f=200$ mm。

2) 切割速度在2.0 m/min时,辅助气体压力范围在14.7 N/cm²切割质量较好。大的辅助气体压力并不一定对切割质量有利,也可能使切口表面的粗糙度更差。

3) 切割截面可分为上切断面、下切断面及中间过渡区域,由于底部氧化速度领先切割速度的差距大于顶部,平整度会较差。

4) 与 CO₂激光切割系统相比, 光纤激光切割系统的切口表面粗糙度小, 切割质量更好, 切割的功率效率提高了2.6倍。

参考文献

- 1 Liao Jianhong, Meng Hongyun, Wang Hongwei, *et al.*. Development and application of fiber laser precision cutting system[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(1): 135-138.
廖健宏, 蒙红云, 王红卫, 等. 光纤激光精密切割系统的研制及其应用[J]. 中国激光, 2007, 34(1): 135-138.
- 2 Liu Songhao. New advances in fiber lasers[J]. Optoelectronic Technology & Information, 2003, 16(1): 1-8.
刘颂豪. 光纤激光器的新进展[J]. 光电子技术与信息, 2003, 16(1): 1-8.
- 3 Chen Shunming. Current situation and development of laser cutting technology[J]. Forging Machinery, 2002, 2: 3-5.
陈树明. 激光切割技术现状与发展[J]. 锻压机械, 2002, 2: 3-5.
- 4 Huang Kaijin, Xie Changsheng. Development of three-dimensional laser cutting[J]. Laser Technology, 1998, 22(6): 352-356.
黄开金, 谢长生. 三维激光切割的发展现状[J]. 激光技术, 1998, 22(6): 352-356.
- 5 James Rutt. Industrial lasers in the united states[C]. SPIE, 1991, 1517: 28-43.
- 6 R Walker. Applying multikilowatt CO₂ lasers in industry[C]. Laser & Applications, 1984. 61-69.
- 7 Martin Sparkes, Markus Gross, Steven Celotto, *et al.*. Inert cutting of medium section stainless steel using a 2.2 kW high brightness fiber laser[C]. 25th International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics (ICALEO), 2006. 197-205.
- 8 Tang Yuanji. Current status of the application of laser cutting in industry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2002, 39(1): 53-56.
唐元冀. 激光切割在工业上应用的现状[J]. 激光与光电子学进展, 2002, 39(1): 53-56.
- 9 Arai Takeji, Miyamoto Isamu. Base of Laser Processing (in Japanese)[M]. Tokyo: Machinist Publication Ltd., 1993.