

文章编号: 1001-3806(2015)02-0228-05

冷轧生产线硅钢激光高速切割实验研究

辛立军^{1,2}, 王智勇^{1*}

(1. 北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124; 2. 辽宁工业大学 材料科学与工程学院, 锦州 121001)

摘要: 为了解决冷轧硅钢生产线上现有的圆盘剪切边技术存在的微裂纹、应力、毛刺和边浪等问题, 采用光纤激光器进行了高速切割工艺研究, 并进行了理论分析与实验验证, 得到了激光高速切割速率和质量数据。结果表明, 激光功率为 3000W 时, 可以得到高达 400m/min 的切割速率; 高速切割过程中, 由于小孔现象的存在以及切割前沿变得平坦, 随着切割速率增加, 切割速率增长幅度因子由 1 降为 0.3, 同时毛刺高度由 5 μm 急剧增加至 22 μm , 切割质量下降; 采用光-气非同心切割方法进行切割, 可以提高高速切割的切割质量, 毛刺高度小于 15 μm 。该研究对为激光高速切割技术提供理论支撑与技术指导是有帮助的。

关键词: 激光技术; 高速激光切割; 光-气非同心; 硅钢

中图分类号: TG485

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.02.018

High speed laser cutting of silicon steel on cold rolling production line

XIN Lijun^{1,2}, WANG Zhiyong¹

(1. Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Institute of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: In order to solve the problems existing in cold rolling production line of silicon steel side cutting, such as micro crack, stress, burr, edge waves, experiments of high speed laser cutting with fiber laser were carried out. The data of cutting speed and cutting quality were obtained. The results show that cutting speed can reach 400m/min when power is 3000W. Because of the closed keyhole and the flat cutting front, with the increasing of cutting speed, the growth factor of cutting speed reduces from 1 to 0.3 and cutting quality becomes poor with burr height from 5 μm to 22 μm . The cutting quality can be improved using light-gas eccentrically laser cutting technology and the burr height is less than 15 μm . The study provides theory support and technology guidance for high speed laser cutting.

Key words: laser technique; high speed laser cutting; light-gas eccentricity; silicon steel

引 言

硅钢是制造变压器、继电器等机电和电子产品的重要材料, 其特点是具有良好的磁性能和较高硅含量, 是电力、电子和军事工业不可缺少的重要材料。精整工序上利用圆盘剪进行切边, 以消除带钢边部缺陷和控制带钢宽度精度^[1-2]。不过, 这种机械加工方法由于刃口直接作用在硅钢上, 切口边缘有微裂纹、应力以及毛刺和边浪的问题^[3-5]。此外, 由于工作时刃口部分承受冲击力、剪切力和弯曲力, 同时刃口部分又受到硅钢板的挤压和摩擦, 非常容易

造成刃口磨损、裂纹或者崩刃而导致失效。

作者针对现有冷轧硅钢生产线圆盘剪切边存在的切边质量差、刀具磨损严重等存在的一系列问题, 对不同激光参量和加工参量下的激光高速切边进行了研究。激光切割技术研究很多, Fraunhofer 激光技术研究所、George 公司等进行了激光的薄板切割研究^[6-8], 0.2mm 厚度的薄板, 最大切割速率达到 130m/min。硅钢生产线上高达 300m/min 的运行速率是本研究的重点与难点。此外, 毛刺是指板料在切边处理后, 出现在板带边部“毛状”的质量缺陷, 其危害是毛刺部分容易造成轧机轧制过程中断带和产品表面压痕缺陷等。在本研究中, 此项质量标准作为检测重点。

作者简介: 辛立军(1982-), 女, 博士研究生, 主要从事激光材料加工及光学系统设计。

* 通讯联系人。E-mail: zywang@bjut.edu.cn.

收稿日期: 2014-03-10; 收到修改稿日期: 2014-05-21

1 实验材料与设备

实验中选用的试样材料是冷轧硅钢, 板厚为

0.3mm。采用的激光器为 IPG 公司生产的高功率光纤激光器,型号为 YLS(Ytterbium Fiber Series)3000-SM 激光器($M^2 = 1.1$)。如图 1 所示。光纤激光器是一种新发展的二极管抽运全固态激光器,具有光束质量好、效率高、性能稳定、寿命长、体积小、运行费用低等显著优点^[9-10]。



Fig. 1 Laser in experiments

取硅钢冷轧生产线最大运行速率为 280m/min,机床或者机械手不能满足要求,因此,作者根据要求设计并制作了高速旋转台以实现激光高速切割,高速旋转台速度可调,最高速率为 500m/min,实验装置如图 2 所示。采用的切割头由 PRECITEC 公司生产,工作头型号为 Precitec AK HP SSL,准直镜焦距 100mm,聚焦镜焦距 125mm。

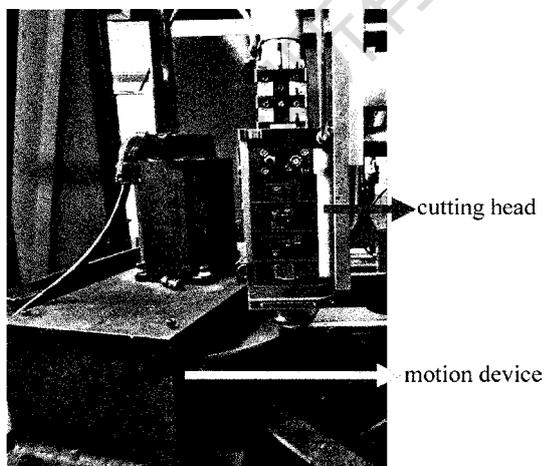


Fig. 2 High-speed motion device

2 实验结果及存在问题

2.1 切割速率增长幅度降低问题

图 3 为实验结果。喷嘴孔径为 1mm,喷嘴间距

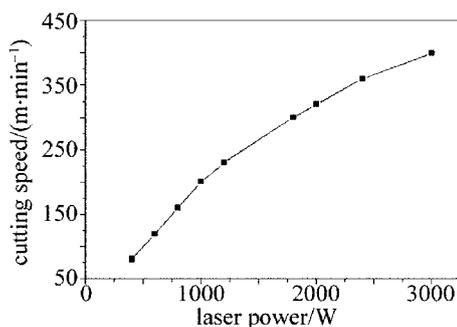


Fig. 3 Results of laser cutting

为 0.8mm。采用 N_2 切割,气体压力为 2MPa。

由图 3 可以看出激光功率对速率的影响。开始阶段,即激光功率在 1000W 以下时,切割速率随激光功率线性增加,激光功率超过 1000W 后,速率增加幅度减小,且这种减小的趋势随着速率增加而增大,即 1000W ~ 2000W 时,幅度因子约为 0.6,2000W ~ 3000W 时,幅度因子降为 0.3 左右。这是因为切割前沿变得平缓,平坦的切割前沿使得熔融金属不易吹除,这是速率降低的一个原因。

2.2 切割质量下降问题

高速切割过程中,由于切割前沿的变化,切割前沿变得平坦,甚至在切缝下部出现滞后量 L ,熔融金属不易吹除,会造成切缝底部挂渣,切割质量下降。图 4 为切缝质量情况。图 4a 为低速下切割断面,可以看出,切割条纹近似垂直,底部无挂渣,图 4b 为高速切割断面,底部出现挂渣,切割质量下降,尤其在切割前沿处出现滞后量时,滞后量不在激光照射范围,更容易在底部重新凝固。

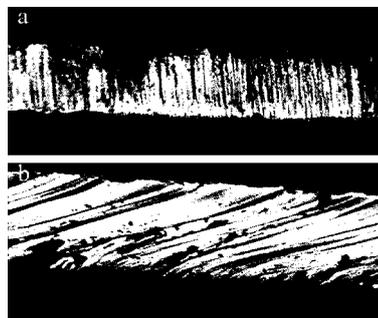


Fig. 4 Quality of kerfs

对切缝底部毛刺高度进行测量。由于板材较薄,因此采用金相显微镜拍照后进行测量。结果如图 5 所示。圆盘剪剪切毛刺高度约为 $15\mu\text{m}$,本实验中,在较低速率时(即速率为 $80\text{m}/\text{min} \sim 200\text{m}/\text{min}$),毛刺高度在 $8\mu\text{m}$ 以下,最小为 $5\mu\text{m}$;但是随着切割速率的增加,毛刺高度急剧增加,达到 $22\mu\text{m}$,超过圆盘剪。

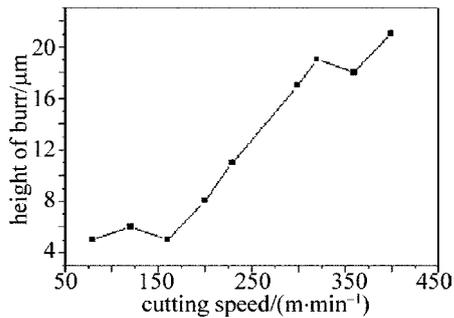


Fig. 5 Height of burr at different parameters

3 切割前沿形状变化

图 6 为不同切割速率下的切割断面形貌。从图

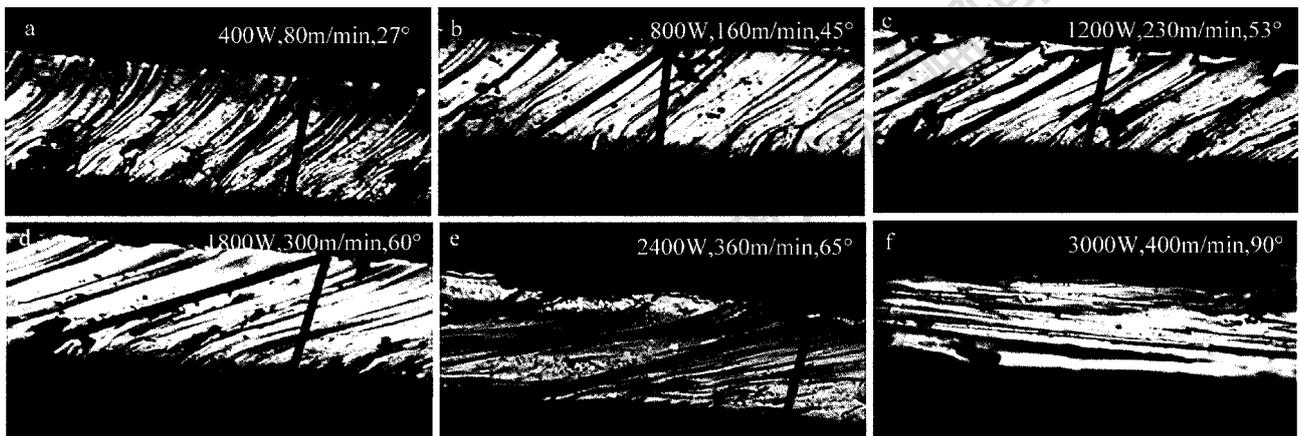


Fig. 6 Stripes at different speeds (200 ×)

可以看出,随着速率的增加,切割前沿的形状变得倾斜或者趋于平坦。切割速率较低时,切割前沿基本与切割方向垂直,如图 7a 所示。此时熔融金属非常容易从切缝中吹除,形成的切割条纹也与切割方向垂直。随着切割速率的增加,造成切割前沿的下部出现水平方向的滞后,切割前沿可以近似为一倾斜的直线,如图 7b 所示。由于切割前沿形状的改变,激光入射角度发生变化,并且由于切割前沿的倾斜,熔融金属已经不能从切缝中很快地吹除,但是此时的改变很微小,对于切割速率影响不是很大,切割断面的条纹略微倾斜。随着速率继续增加,切割前沿的形状更加倾斜,滞后量非常明显,如图 7c 所示。此时,由于激光入射角度变化很大,吸收率减小,并且过大的切割前沿倾角使得熔融金属不易吹除,非常容易造成底部的粘渣。在此基础上继续增加切割速率,切割前沿处的滞后量增加,甚至超出激光束辐照范围,如图 7d 所示。这个形状的改变引起切割前沿下部熔融金属也随之变化,熔融金属紊乱,粗糙度增加。

中可以看出,随着切割速率的增加,熔融金属的流动方向发生改变,高速切割时切割前沿倾角变化较大,从切割断面的条纹形貌可以测量出,切割速率从 80m/min 增加到 400m/min,切割前沿的倾角在 27° 到 90° 之间变化。即切割前沿随着切割速率的增加而变平缓。速率增加到足够大时,如图 6f 所示,切割前沿基本与切割方向平行,此时,熔融金属从切缝中吹除十分困难,切缝底部存在挂渣现象。

此外,随着切割速率的增加,切割前沿处的熔融金属滞后现象开始明显。如图 6e 所示,切割前沿已经不再是倾斜的直线,而是存在“拖尾”。

图 7 为切割前沿随速率变化的示意图。从图中

这是因为随着切割速率的增加,切割前沿变得平坦,切割前沿处的滞后现象明显,滞后的熔融金属重新凝固,形成挂渣。由图 6e 测量结果显示,熔融金属从切割前沿处熔化到最终被辅助气流吹除,之间相差 0.5mm 以上。气流在切割前沿上方,对于滞后的熔融金属吹除能力很弱。因此,不能有效吹除熔融金属。

高速切割过程中,切割前沿处的大量金属蒸汽形成很高的压力梯度,将熔融金属向着切割边缘横向方向吹出,使得熔融金属从切割前沿处的上部向两侧移动。这将导致切缝两侧充满熔融金属,在某些情况下,可以使切口背后的反应区再次闭合,形成闭合的小孔。图 8 为激光切割时切割前沿形状示意图。高速切割的切割前沿区域,熔融金属的流动方向主要为激光束周围的水平方向流动。此时,熔融金属喷射位置离激光束较远,位于激光束后方,甚至会离开激光束的辐照范围。这也是随着切割速率增加,切割质量急剧下降的原因之一。

此时,需要改变气体吹除位置,采用光-气非

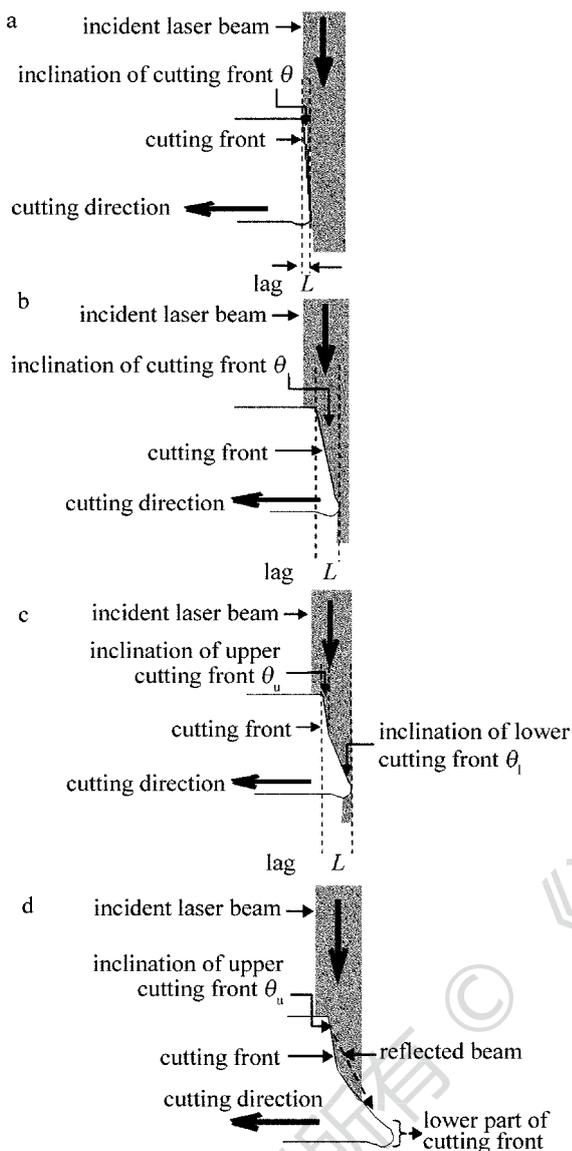


Fig. 7 Sketch of laser cutting front

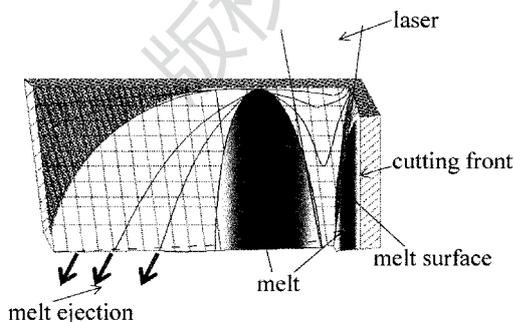


Fig. 8 High speed laser cutting front

同心切割技术,即光束位于气体吹除位置之前,如图 9 所示。采用光-气非同心切割方法,优化工艺参量后,对切割边缘的毛刺高度进行测量,结果如图 10 所示。可以看出,低速下,光-气非同心切割方法效果并不明显,这是因此此时切割前沿倾角变化不大,

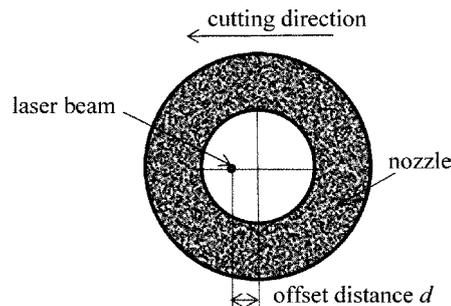


Fig. 9 Sketch of relative position of laser beam and gas jet

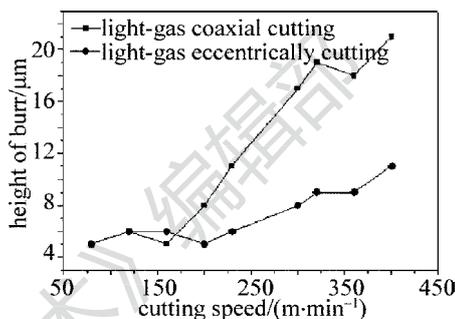


Fig. 10 Height of burr with different cutting methods

光-气非同心方法反而使得辅助气流的对熔融金属的吹除作用减弱;高速下效果明显,整体毛刺高度在 10μm 以下,优于圆盘剪切割的切割质量。可见,激光切割技术可以应用于硅钢切边。

4 结论

(1) 硅钢高速切割,3000W 的切割速率可以达到 400m/min。随着激光功率的增加,切割速率增加但是速率增加幅度降低,切割质量下降,容易存在挂渣。毛刺高度不能满足要求。

(2) 高速切割过程中会有小孔现象的产生。切割前沿变得平坦,滞后量很大,气体吹除作用减弱,影响切割质量。

(3) 光-气非同心高速切割方法有助于提高切割质量,激光技术可以应用于硅钢切边。

参 考 文 献

[1] INSTITUTE OF NONFERROUS METAL, MINISTRY OF METALLURGICAL INDUSTRY. Design of machinery equipment for workshop of strip plant [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1983: 172-191 (in Chinese).

[2] SANKEVICH V P. Rotary disk shears with mechanized trimming adjustment [J]. Metallurgist, 2007, 14(3): 186-187.

[3] ZOU J X. Rolling machine [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989: 115 (in Chinese).

[4] LIN H G. Application manual of die materials [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004: 62-67 (in Chinese).

[5] LI W Y. Cause analysis and improvement of cold strip's trimmed waves [J]. Bao Steel Technology, 2004(4): 1-4 (in Chinese).

- [6] KAI U P, DIRK P. High speed laser cutting of thin metal sheets [J]. Proceedings of the SPIE, 1996, 2207: 96-110.
- [7] LEE K H, KIM K C, LEE J H. Laser cutting characteristic of cold rolled steel sheets [J]. Journal of KWS, 1995, 13(4): 369-371.
- [8] HAN Y H. Laser beam quality and process efficiency [J]. Spring Annual Meeting Proceedings of Korean Society of Processing, 2006, 7(2): 42-43.
- [9] THOMY C, SEEFELD T, VOLLERTSEN F. High-power fiber lasers application potentials for welding of steel and aluminum sheet material [J]. Advanced Materials research, 2005, 6/8: 171-178.
- [10] HÜGEL H. New solid-state lasers and their application potentials [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34(4/6): 213-229.

版权所有 © 《激光技术》编辑部