

基于速度控制的碟片高功率激光切割方法研究

杨赛丹 吴瑞珉 丁 烨

宝山钢铁股份有限公司研究院, 上海 201900

摘要 以碟式激光器为光源对象,通过激光切割的方法对试验装置进行延迟调节,获得数控控制系统与激光控制系统之间的延时值,进而实现了二者的同步以保证系统的高功率激光切割质量。介绍了基于速度控制的激光功率控制原理与实现方法,实现了功率的实时调节与闭环控制。给出了一种 1.0 mm 厚高强钢 HC1030/1300 MS 的高速激光切割效果,进行了边部热影响区及毛刺测试,获得了满足用户要求的切割质量。对 0.7~2.0 mm 汽车用钢进行了激光切割研究,结果表明,板厚随激光能量发生线性变化。

关键词 激光技术;激光切割;速度同步;控制;能量

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.081405

Research on High Power Disk Laser Cutting Method by Speed Control

Yang Saidan Wu Ruimin Ding Ye

Baoshan Iron & Steel Co.,Ltd Research Institute, Shanghai 201900, China

Abstract With the disk laser as an optical source, the delay time of the experimental device is set through the laser cutting method. The delay time between the numerical control system and the laser control system is studied, thus the synchronization is achieved in order to guarantee the cutting quality. The theory and implementation of laser power control by the speed are studied to achieve the real-time adjustment and closed-loop control of power. The cutting qualities of HC1030/1300 MS high-stress steel of 1 mm in thickness are presented which are cut under the real time synchronous condition. Hot affected zone and burr edge are tested which can meet users requirements. Besides, the study on the laser cutting of car-body steel from 0.7 mm to 2.0 mm in thickness shows that laser energy is linear with respect to the thickness of plate.

Key words laser technique; laser cutting; speed synchrony; control; energy

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 150.5758

1 引言

碟片激光器自 2005 年起已实现稳定商用,功率高于 1 kW 的碟片激光器在冶金、车辆制造、船舶、航空等工业领域已广泛用于各种切割与焊接^[1-3]。随着高功率输出能力不断被提升,单千瓦价格优势逐步体现,它正成为激光加工系统装备中的关键装置,是诸多材料加工领域中的重要手段^[4-6]。碟片激光器的大输出功率与高光束质量是其重要的特征,同时,由于采用光纤传输及功率实时控制的先进技术,更能体现加工柔性 with 功率稳定性,配合数控或机器人等自动化结构,能实现非常理想的激光高速切割加工应用,从而可大大缩短加工周期与降低成本。对碟片激光器开展相关速度控制方式与试验应用研究,对系统装备稳定应用与保障切割质量是一项关键工作,也能推进高功率激光切割技术的进一步应用。

2 试验装置

采用通快 TRUMPF 公司的型号 TruDisk5001 激光器与普雷斯特 Precitec 公司的型号 HP SSL 激光切割头,其中激光器最大输出功率 5000 W,波长 1030 nm,光纤芯径 100 μm ,光束参数积(BPP)为 4 mm·mrad,切割头聚焦镜焦距 125 μm ,准直镜焦距 100 μm ,在焦点处光斑直径为 0.125 mm。采用坤戈 GUDEL 公司平面执行机构用于在 XYZ 方向移动激光切割头从而实施对汽车用钢的高速激光切割并进行相关研究。

收稿日期: 2015-01-05; 收到修改稿日期: 2015-02-02; 网络出版日期: 2015-07-16

作者简介: 杨赛丹(1981—),女,硕士,工程师,主要从事激光应用方面的研究。E-mail: yangsaidan@baosteel.com

为了保证试验稳定性,首先对激光功率进行了测试,结果如表1所示。

表1 激光功率测试表

Table 1 Test of laser power

Power setting /W	Power measurement /W	Deviation /%
500	537	7.4
1000	1046	4.6
2000	2062	3.1
3000	3088	2.9
4000	4105	2.6
5000	5121	2.4

激光器运行正常,功率输出稳定,设备功率波动要求小于10%,实际测量功率波动范围在2.4%~7.4%之间,达到试验要求。

3 基于速度控制的研究

3.1 同步控制方法及其试验

在执行切割过程中,数控控制轴的运动速度与激光控制功率输出的速度二者间应保持同步,实现同步将获得匹配的不同速度下所对应的不同激光功率参数,以保证基于速度控制下激光功率参数的实时闭环控制,而排除由于数控控制的延迟响应而导致以速度控制的激光功率参数的偏移,最终影响激光切割质量。数控控制与激光控制间的关系,如图1所示,表示为

$$\Delta T = T_{\text{LASER}} - T_{\text{CNC}}, \quad (1)$$

式中 T_{LASER} 为激光控制出光响应时间; T_{CNC} 为数控控制轴响应时间;延迟值 ΔT 为数控控制与激光控制间延迟时间。

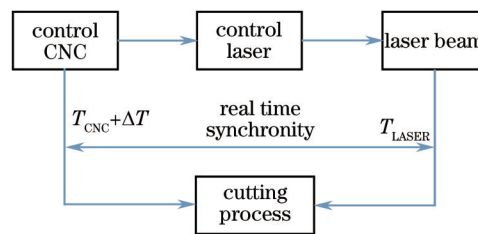


图1 数控控制与激光控制关系

Fig.1 Relationship between CNC and laser control

在本系统装置中,设计了数控控制与激光控制的同步输出并通过加速段打点与减速段打点一致性的试验,以测试二者之间的延时,并进行了延时值设置使数控速度与激光速度的信号同步,从而保证一致的切割质量。

其中,为了在钢板上实现可见的脉冲打点,对激光低速的脉冲频率进行了参数化,激光脉冲时间为

$$T = \frac{\bar{P}}{F \cdot P}. \quad (2)$$

当激光频率 $F=275 \text{ Hz}$, 峰值功率 $P=2000 \text{ W}$, 平均功率 $\bar{P}=180 \text{ W}$ 时,激光脉冲时间 $T=0.3 \text{ ms}$,可获得有效的打点效果,如图2所示。经过试验,当数控控制与激光控制延迟值为 12 ms 时,可得到如图2所示的点与点间

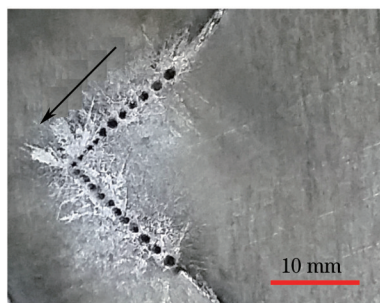


图2 激光同步打点试验

Fig.2 Synchronous test of laser boring

隔均匀的加速段与减速段的打点效果,说明二者之间的延迟值已经得到匹配。在无延时情况下,切割将出现加速段切断、减速段未切断现象,说明了加减速段的差异与存在延时的现象,不进行匹配将导致切割质量问题。

3.2 基于速度的激光功率控制分析

碟式激光具有基于速度的激光控制模块,它的基本原理是:在数控控制系统中定义速度对应电压的模拟量信号值范围,在数控系统可编程逻辑控制器(PLC)中获得一定速度下的模拟量值,并在激光器中的模拟量输入(AEF)板卡上输入该模拟量信号,在激光控制系统中定义同步的速度对应电压模拟量范围,当模拟量信号输入到激光器中,通过基于速度的激光控制模块换算,激光器的功率可以得到对应电信号的定义而输出相应值,从而实现基于速度控制的激光功率输出。这种方法实现了功率的实时闭环控制,利于获得更优的边部切割质量与更高的切割效率。

基于以上控制方式,以先进的高强钢汽车冷轧板 1 mm-HC1030/1300 MS 为对象,研究了该模块下对应的工艺参数,该钢种屈服强度为 1030~1300 MPa,抗拉强度不小于 1300 MPa,主要用于汽车的结构加强件和安全件,例如汽车前后保险杠、侧门内的防撞杆和门槛板等关键部件^[7]。试验中,切割最快速度为 45 m/min,数控系统单轴加速度为 1.5 m/s^2 ,在单轴方向的切割行程长度为 750 mm。

图3为该激光切割作业下功率控制变化过程。 \hat{P}_1 与 \hat{P}_2 峰值功率分别为恒功率脉冲与变功率最高脉冲峰值功率,在 \hat{P}_1 与 \hat{P}_2 间激光实现脉冲段的连调; P_1 与 P_m 分别为连续功率调节的最低与最高功率值,在 P_1 与 P_m 间激光实现连续功率连调。在低速脉冲光恒功率段,速度小于 0.5 m/min, $\hat{P}_1=300 \text{ W}$,脉冲频率 $F_1=1000 \text{ Hz}$,切割质量佳;在超低速段,速度瞬时变化,因此采用恒定脉冲功率方式而不用随时调节,达到稳定的输出目的。在低速脉冲光变功率段,速度等于 8 m/min, $\hat{P}_2=2000 \text{ W}$,脉冲频率 $F_2=2000 \text{ Hz}$,切割质量佳;在此低速段,随着速度的变化,采用脉冲光功率随速度线性变化的调节方式,达到稳定功率输出目的。在高速连续光变功率连调段,速度介于 8~45 m/min, $P_1=1000 \text{ W}$, $P_m=4000 \text{ W}$,切割质量佳;在此高速段,进入连续光随速度线性变化的调节方式,直至高于 45 m/min,均以恒功率方式输出。

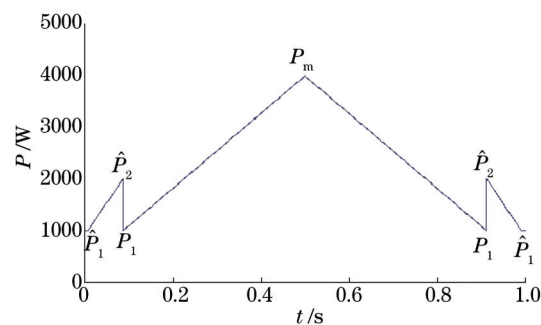


图3 激光功率随时间输出的变化

Fig.3 Variation of laser power with time

在以上激光参数基础上,进行了切割试验并对样件进行了多组取样,获得的切割质量平均热影响区(HAZ)小于 $100 \mu\text{m}$,图4中 HAZ 最大值为 $76.4 \mu\text{m}$,边部毛刺如图5所示。激光切割工艺为 1.2 MPa 氮气气压,1.5 mm 喷嘴直径,-0.8 mm 离焦量,1 mm 喷嘴与板间距。

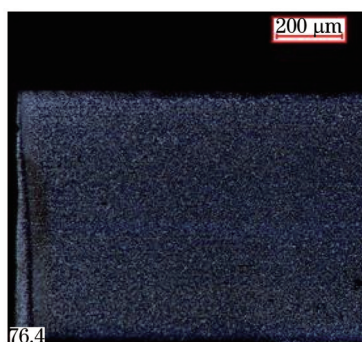


图4 HAZ宽度测试

Fig.4 Test of HAZ width

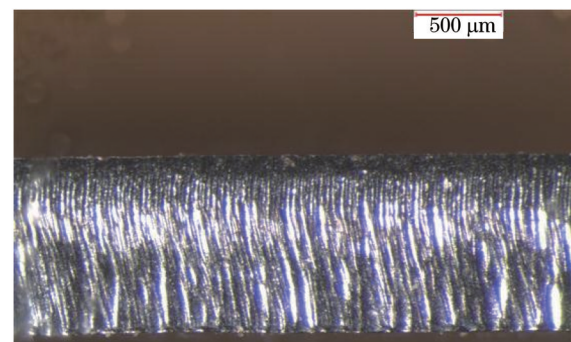


图5 切割边部微观状态

Fig.5 Microscopic image of incision

3.3 激光能量研究

对于常规使用的汽车板件(厚度 0.7~2.0 mm)的典型钢在达到边部毛刺质量合格条件下,对切断材料进行最快切割速度试验,基于最快的切割速度需要的单位长度激光能量为

$$E = \frac{P}{v}, \quad (3)$$

式中 P 为激光功率(W), v 为切割速度(mm/s)。当单位长度能量在切割过程中与厚度不匹配时,即会出现能量不足时的切割不断或能量过高时的边部结瘤现象。在拐点或接近拐点的加减速区域,能量与速度的不匹配关系对切割效果的影响将更加明显,以致最终对切割质量产生严重影响。试验系统中,实现不同板厚的最快切割速度下,试验分析并得到激光单位长度能量 E (J/mm)随板厚 d (mm)呈线性关系,如图 6 所示。

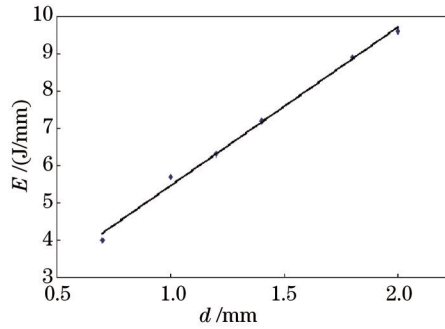


图 6 激光单位长度能量随板厚关系

Fig.6 Relationship of laser energy per unit length with thickness

由此,根据 Steen 提出的切割能量判定方法^[8],切割过程中的单位面积能量 E_A (J/mm²)为

$$E_A = \frac{P}{v \cdot d}. \quad (4)$$

最快切割速度下的单位面积能量如表 2 所示。

表 2 各板厚下激光单位面积能量

Table 2 Laser energy per unit area of different thicknesses

Thickness / mm	E_A / (J/mm ²)
0.7	5.71
1.0	5.70
1.2	5.27
1.4	5.14
1.8	4.94
2.0	4.80

4 结 论

实现了一种便捷可靠的数控控制与激光控制实时同步的测试与调节方法,获取延时时间后实现了系统的同步控制,在此基础上,进行了碟式高功率激光高速切割试验研究。通过激光功率控制原理与参数分析,实现了激光参数有效同步输出,以 1 mm-HC1030/1300MS 高强钢为对象,进行激光参数与速度同步的切割,有效评估了激光切割边部 HAZ 与毛刺,获得了优良的边部质量。进一步分析了激光能量与板厚的关系以及获得了单位面积激光能量数据。通过以上研究,使碟式高功率激光进行高质量的钢板切割,实现了一项新工艺方式的应用。

参 考 文 献

- 1 Chen Genyu, Zhou Yu, Zhang Mingjun, *et al.*. Study on improving surface quality of weld of autogenously laser welding of thick plate with high power fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103011.
陈根余,周宇,张明军,等. 大功率光纤激光厚板自熔焊缝表面质量改善研究[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103011.
- 2 Zhao Lin, Tsukamoto Susumu, Arakane Goro, *et al.*. Influence of welding parameters on weld depth and porosity in high power fiber laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103004.

- 赵琳, 塚本进, 荒金吾郎, 等. 大功率光纤激光焊接过程中工艺参数对熔深和气孔的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103004.
- 3 Xu Guojian, Li Hongli, Hang Zhengxiang, *et al.*. Performance of 6 mm mild steel sheet laser cutting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 040601.
- 徐国建, 李宏利, 杭争翔, 等. 6 mm 碳钢板的激光切割性能[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040601.
- 4 Wang Yuying. The development of disc laser application technology[J]. *Ome Information*, 2007, 24(6): 21-23.
- 王玉英. 盘形激光器应用技术的发展趋势[J]. 光机电信息, 2007, 24(6): 21-23.
- 5 Zeng Leyong. Industrial application of high power disk laser[J]. *Ome Information*, 2009, 26(4): 13-17.
- 曾乐勇. 高功率盘形激光器的工业应用[J]. 光机电信息, 2009, 26(4): 13-17.
- 6 Gao Xiangdong, Zhang Yanxi. Prediction model of weld width during high-power disk laser welding of 304 austenitic stainless steel[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15(3): 399-405.
- 7 Wang Li, Lu Jiangxin. Progress in high strength steel sheets for automobiles at Baosteel[J]. *Baosteel Technology*, 2009, S1: 36-40.
- 王利, 陆匠心. 宝钢高强度汽车板技术进展[J]. 宝钢技术, 2009, S1: 36-40.
- 8 B Adelman, R Hellmann. Fast laser cutting optimization algorithm[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 591-598.

栏目编辑: 张 雁