

自动流量平衡阀过流曲线激光切割工艺

李淑玉¹ 田新国^{2*} 贺敬地² 刘超²

(¹青岛理工大学汽车与交通学院, 山东 青岛 266033)
(²青岛理工大学工程训练中心, 山东 青岛 266033)

摘要 采用 Nd:YAG 激光器切割自动流量平衡阀过流曲线,以切缝宽度、切口表面粗糙度和熔渣量作为衡量指标,研究输出电流、扫描速度、焦点位置、辅助气体种类和压力对自动流量平衡阀过流曲线切割质量的影响。获得了较为理想的切割工艺参数:输出电流为 175 A,脉冲宽度为 0.3 ms,脉冲频率为 70 Hz,扫描速度为 40 mm/s,氧气压力为 1.0 MPa,离焦量为 0。采用该工艺参数,切割出了高质量的过流曲线。

关键词 激光技术;激光切割;加工工艺;空间曲线

中图分类号 TN249;TG485 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1003008

Laser Cutting Flow Curve of Automatic Flow Control Valves

Li Shuyu¹ Tian Xinguo² He Jingdi² Liu Chao²

(¹College of Automotive and Transportation, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China)
(²Engineering Training Center, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China)

Abstract The processing techniques including output current, scanning speed, defocusing distance, auxiliary gas species and pressure, which influence the quality of the flow curve, have been studied with the Nd:YAG lasers. The cutting quality is measured by the kerf width, surface roughness of the incision and slag quantity. The best processing parameters have been gained with the analyses and experiments. The high quality flow curve has been cut with the output current of 175 A, pulse width of 0.3 ms, pulse frequency of 70 Hz, scanning speed of 40 mm/s, defocusing distance of 0 and oxygen gas pressure of 1.0 MPa.

Key words laser technique; laser cutting; processing techniques; space curve

OCIS codes 140.3390; 140.3530; 140.3580; 250.3850; 350.3390

1 引言

自动流量平衡阀属于自力式流量控制阀,利用管路内的自身压力控制内部高精度弹簧的变形量,带动端帽运动来改变总体通流面积,使通过阀门的流量保持动态恒定,能有效地解决复杂管网的流量失调,自动保证管网的安全运行,广泛应用于建筑、消防、供暖、石油和化工等系统管网^[1,2]。为了保证自动流量平衡阀的控制精度,需尽量提高过流曲线的加工精确。激光切割技术具有加工精度高、切缝不变形、切口无毛刺、切割速度快且不受加工形状限制等优点^[3~5],可以很好地完成对过流曲线的切割。

影响激光切割质量的因素较为复杂,激光功率、切割速度、焦点位置、光束模式、工件本身特性、辅助气体种类和压力是其中 7 个最重要的因素^[6,7]。自

动流量平衡阀过流曲线激光切割属于薄壁管材上的空间曲线切割,虽然针对激光平面切割的工艺研究已经较为完善^[8,9],但使用激光切割空间曲线与切割平面曲线不同,空间曲线切割时除了要保证正确的切割轨迹,还要注意选择合理的加工参数,尤其是切割薄壁管材时,管材在厚度方向上是一个封闭结构,使得管材的散热条件较为复杂,而且壁厚较薄,切割所得的空间曲线易产生热变形。如何选择合理的加工参数以提高其切割质量就成为加工时的主要问题。本文以切缝宽度、切口表面粗糙度和熔渣量作为衡量指标,利用 Nd:YAG 激光器研究输出电流、扫描速度、焦点位置、辅助气体种类和压力对自动流量平衡阀过流曲线切割质量的影响,以切割出高质量的过流曲线。

收稿日期: 2011-05-16; 收到修改稿日期: 2011-06-28

作者简介: 李淑玉(1966—),女,副教授,主要从事特种加工与模具技术方面的研究。

*通信联系人。E-mail: tianxinguo1988@163.com

2 实验方法与设备

实验采用壁厚为 1 mm, 直径为 20 mm, 材质为 1Cr18Ni9Ti 的不锈钢圆管, 切割系统如图 1 所示。其中工作台由水平移动轴 x 轴、 y 轴和转动轴 z 轴组成, 当进行过流曲线的切割时, 由 x 轴的平移和 z 轴的转动完成工件相对激光束的移动, 按照要求在圆管上切割出过流曲线。实验设备采用 JHM-1GY-500 型多功能激光加工机, 波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 脉冲频率为 $1 \sim 200 \text{ Hz}$ 连续可调, 脉冲宽度为 $0.1 \sim 20.0 \text{ ms}$ 连续可调, 脉冲工作电流为 $100 \sim 450 \text{ A}$, 激光器输出的最大单脉冲能量为 90 J , 切割聚焦镜焦距为 75 mm , 聚焦后光斑直径为 0.15 mm 。

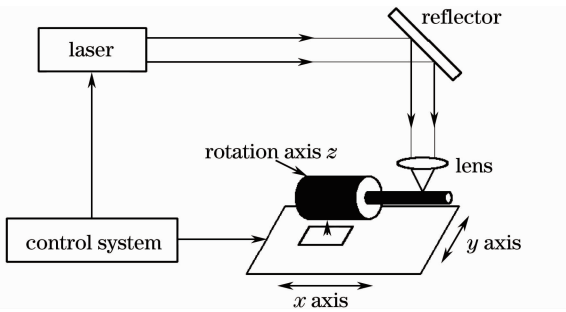


图 1 激光切割系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the laser cutting system

3 实验结果与分析

3.1 辅助气体种类及压力对切割质量的影响

激光切割时辅助气体与激光束同轴由喷嘴喷出, 保护透镜免受污染并吹走激光切割区域的熔渣, 使切割过程持续顺利进行, 并有利于提高工件对激光的吸收率。激光切割不锈钢圆管时若采用氮气作辅助气体, 切缝窄, 切口表面粗糙度小, 切口白亮, 无烧边现象, 但所需激光功率较高, 切割速度明显降低。若采用氧气作为辅助气体, 切割时切口区在高温下发生氧化放热反应, 使切割过程加速, 从而提高了切割能力^[10,11]。另一方面, 奥氏体不锈钢中铬、镍等元素使得熔化层氧化不完全, 与工件之间有较大的黏附力, 易在切口的下沿留有熔化残渣。

为获得氧气压力对过流曲线切割质量的影响, 选择输出电流为 175 A , 脉冲宽度为 0.3 ms , 脉冲频率为 70 Hz , 扫描速度为 40 mm/s , 焦点位于圆管表面, 调整氧气压力进行切割实验, 测量结果见表 1, 氧气压力对切缝宽度和切口表面粗糙度的影响如图 2 所示。另外, 实验中为了更好地反映各因素对切口表面粗糙度的影响, 取切割后工件下表面约 $1/3$ 处的粗糙度值作为评价标准^[12]。

表 1 氧气压力对切割质量的影响

Table 1 Influence of oxygen pressure on cutting quality

| Oxygen pressure P / MPa | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 1.6 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Kerf width t / mm | 0.17 | 0.18 | 0.19 | 0.20 | 0.21 | 0.22 | 0.22 |
| Incision surface roughness $R_a / \mu\text{m}$ | 1.2320 | 1.2224 | 1.2100 | 1.1956 | 1.2028 | 1.2270 | 1.2452 |
| Slag quantity | seldom | seldom | seldom | little | seldom | much | much |

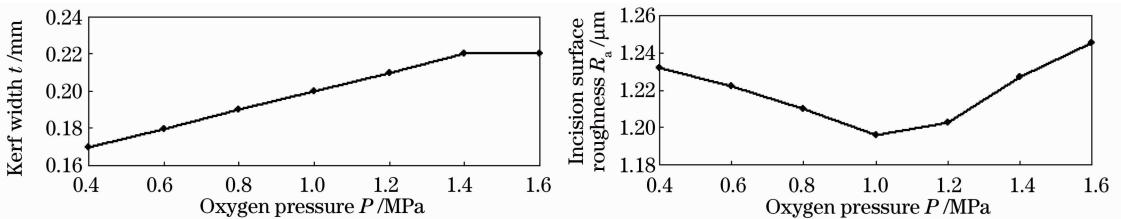


图 2 切缝宽度和切口表面粗糙度随氧气压力的变化

Fig. 2 Kerf width and incision surface roughness change with oxygen pressure

从图 2 可以看出, 切缝宽度随氧气压力的增大而增大, 并趋于稳定, 切口表面粗糙度先减小后增大。这是因为氧气压力较低时, 熔融材料氧化不完全, 与工件之间有一定的黏附力, 不易完全从切口吹除, 切口表面粗糙度较大。随着氧气压力的增大, 材料氧化放热反应越剧烈, 熔融的材料越多, 切缝宽度变大, 同时熔融材料氧化程度提高, 氧气流速度提

高, 熔渣排出越彻底, 切口表面粗糙度逐渐降低。随着氧气压力继续增大, 高的气流速度对激光作用区冷却效应增强, 使切口区吸收的有效热量渐渐恒定, 切缝宽度趋于稳定, 当氧气压力超过一定值时, 容易在工件表面形成涡流, 削弱了气流去除熔融材料的作用, 切口表面粗糙度逐渐增大。

另外, 当输出电流和扫描速度一定时, 适当增加

氧气压力,可使得切割速度增加,但达到一定数值后,继续增加氧气压力除增强气流对加工区的冷却效应外,还可能对激光作用区产生干扰,造成切割前沿扰动层不稳定,导致切割速度下降。而且氧气中的杂质也会对切割质量造成不良影响,为了获得良好的切口质量,激光切割过程中宜使用适当压力的高纯度氧气。

表2 输出电流对切割质量的影响

Table 2 Influence of output current on cutting quality

| Output current I /A | 160 | 165 | 170 | 175 | 180 | 185 | 190 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Kerf width t /mm | 0.17 | 0.18 | 0.19 | 0.20 | 0.22 | 0.24 | 0.28 |
| Incision surface roughness R_a / μm | 1.6534 | 1.4276 | 1.2368 | 1.0772 | 0.9523 | 0.8468 | 0.8398 |
| Slag quantity | seldom | seldom | seldom | little | seldom | much | much |

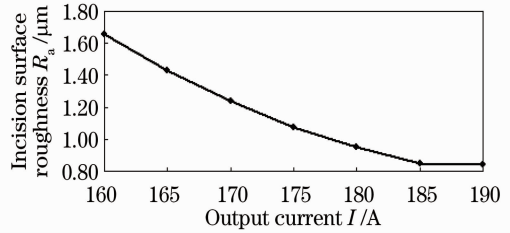
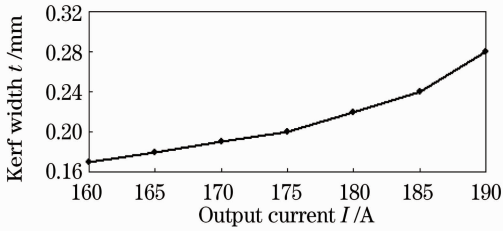


图3 切缝宽度和切口表面粗糙度随输出电流的变化

Fig. 3 Kerf width and incision surface roughness change with output current

从图3可以看出,随着输出电流的提高,切缝宽度明显增大,切口表面粗糙度逐渐减小,并趋于稳定。这是因为输出电流较小时,激光束提供的能量不足以使材料快速熔化,切缝宽度较小,材料无法完全熔化,熔融材料没有被高速的氧气完全排出,造成部分熔融金属黏附在切口表面,切口表面粗糙度较大。随着输出电流的提高,单位时间内熔融的材料更多,切缝宽度增大,材料熔融程度提高,产生的熔渣被高速的氧气流排出越彻底,切口表面粗糙度逐渐减小,当输出电流增大到一定值时,熔渣被彻底排出,切口表面粗糙度趋于稳定。

输出电流与扫描速度在很大程度上决定了输入到

表3 扫描速度对切割质量的影响

Table 3 Influence of scanning speed on cutting quality

| Scanning speed V /(mm/s) | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Kerf width t /mm | 0.25 | 0.24 | 0.22 | 0.21 | 0.20 | 0.20 | 0.19 |
| Incision surface roughness R_a / μm | 1.0859 | 1.0837 | 1.0820 | 1.0805 | 1.0792 | 1.0807 | 1.0821 |
| Slag quantity | much | much | seldom | little | little | seldom | seldom |

从图4可以看出,随着激光扫描速度的增加,切缝宽度随之减小,但变化不大,切口表面粗糙度先减小后增大。这是因为扫描速度过低时,氧化反应放出的热在切口前沿的作用时间长,切缝宽度大,切口波浪形比较严重,切割面比较粗糙。随着扫描速度

3.2 输出电流对切割质量的影响

实验中脉冲宽度为0.3 ms,脉冲频率为70 Hz,扫描速度为40 mm/s,氧气压力为1.0 MPa,焦点位于圆管表面,调整输出电流进行切割实验,测量结果见表2,输出电流对切缝宽度和切口表面粗糙度的影响如图3所示。

工件上的能量,输出电流即输出功率一定时,脉冲激光切割存在一个极限速度,当扫描速度大于这个极限值时,将出现无法连续切断的现象,切割就变成打孔。在其他条件不变时,增大输出电流,切割速度范围也随之扩大,提高了切割质量的稳定性和加工效率。

3.3 扫描速度对切割质量的影响

输出电流为175 A,脉冲宽度为0.3 ms,脉冲频率为70 Hz,氧气压力为1.0 MPa,焦点位于圆管表面,调整扫描速度进行切割实验,测量结果见表3,扫描速度对切缝宽度和切口表面粗糙度的影响如图4所示。

的提高,激光束与材料的交互作用时间变短,热传导和扩散效应变小,切缝宽度减小,切口表面粗糙度减小,随着扫描速度的持续增大,切口前沿的熔化速度逐渐跟不上激光束的移动速度,切口出现拖线,切口表面粗糙度增加。

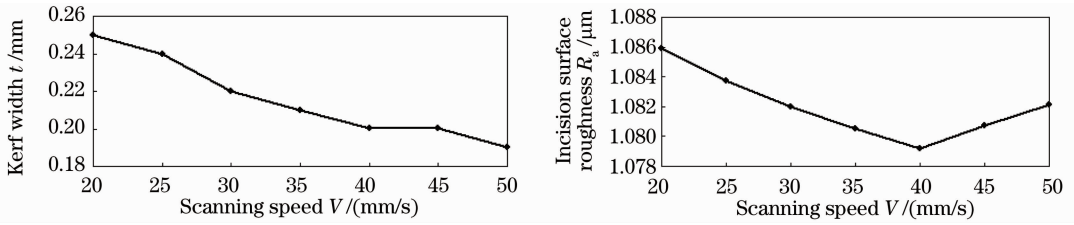


图 4 切缝宽度和切口表面粗糙度随扫描速度的变化

Fig. 4 Kerf width and incision surface roughness change with scanning speed

扫描速度取决于激光功率密度及工件的性质等因素,在氧气压力和输出电流等工艺参数一定的情况下,有最佳的切割速度范围。扫描速度过高,切口熔渣量大,切口表面粗糙;扫描速度过低,则工件过烧,切口宽度和材料热影响区过大。适当增加输出电流和氧气压力,可以使切割速度范围扩大。

3.4 离焦量对切割质量的影响

输出电流为 175 A,脉冲宽度为 0.3 ms,脉冲频率为 70 Hz,切割速度为 40 mm/s,氧气压力为 1.0 MPa,调整焦点位置进行切割实验,测量结果见表 4,离焦量对切缝宽度和切口表面粗糙度的影响如图 5 所示。

表 4 离焦量对切割质量的影响

Table 4 Influence of defocusing distance on cutting quality

| Defocusing distance h /mm | -1.0 | -0.5 | -0.3 | 0 | 0.3 | 0.5 | 1 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Kerf width t /mm | 0.23 | 0.21 | 0.18 | 0.19 | 0.20 | 0.22 | 0.25 |
| Incision surface roughness R_a / μm | 1.3314 | 1.2728 | 1.1609 | 0.9872 | 1.0725 | 1.2069 | 1.2748 |
| Slag quantity | much | much | seldom | little | seldom | much | much |

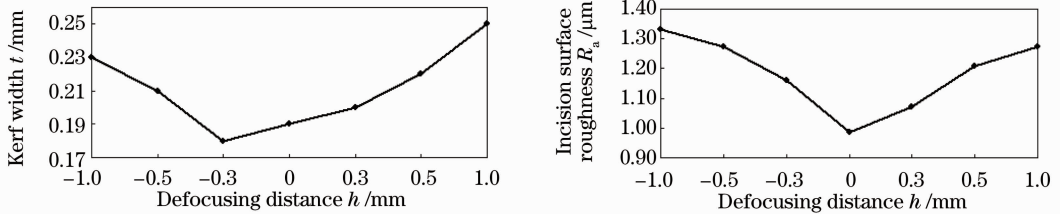


图 5 切缝宽度和切口表面粗糙度随离焦量的变化

Fig. 5 Kerf width and incision surface roughness change with defocusing distance

从图 5 可以看出,随着离焦量的增大,切缝宽度先减小后增大,离焦量为 -0.3 mm 时,切缝宽度最小;切口表面粗糙度同样先减小后增大,离焦量为零时,切口表面粗糙度最小。经过大量的实验,切割出

图 6 所示的高质量过流曲线,切缝整齐、光滑,表面粗糙度低,几乎无熔渣,经测试得到切缝宽度为 0.19 mm,切口表面粗糙度为 1.0710 μm 。切割工艺参数:输出电流为 175 A,脉冲宽度为 0.3 ms,脉冲频率为 70 Hz,扫描速度为 40 mm/s,氧气压力为 1.0 MPa,离焦量为 0。



图 6 采用最佳工艺参数切割的过流曲线

Fig. 6 Flow curve cutting with the best processing parameters

4 结 论

随着激光理论和切割工艺研究的逐步深入,机器人和自动控制技术的发展,三维激光切割技术具有十分广阔的应用前景。实验结果表明,采用 Nd:YAG 激光器切割自动流量平衡阀过流曲线时,输出电流、扫描速度、氧气压力和焦点位置直接影响着切割质量,通过分析各因素对切割质量的影响规律,选择合适的工艺参数可以切割出高质量的自动流量平衡阀过流曲线。经过大量的实验,得出较为理想的切割工艺参数:输出电流为 175 A,脉冲宽度为

0.3 ms, 脉冲频率为 70 Hz, 扫描速度为 40 mm/s, 氧气压力为 1.0 MPa, 离焦量为 0。

参 考 文 献

- 1 Shen Xinrong, Li Zengzhen, Li Jiangli. Experimental investigation of an automatic flux compensation valve[J]. *Fluid Machinery*, 2006, **34**(11): 4~7
沈新荣, 李增珍, 李江莉. 一种自动流量平衡阀的实验研究[J]. *流体机械*, 2006, **34**(11): 4~7
- 2 Zhou Yangmin, Guo Jianxiang, Fang Junxi *et al.*. Finite element analysis of automatic flow control valve's change face [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2006, (1): 146~147
周扬民, 郭健祥, 房俊喜等. 自动流量平衡阀可变过流面端帽的有限元分析[J]. *机床与液压*, 2006, (1): 146~147
- 3 Hong Lei, Mi Chenglong, Liu Dejin. Laser cutting special steel sheet controlled by rotating gas flow[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 543~547
洪蕾, 米承龙, 柳德金. 旋转气流控制激光切割特种钢薄板[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 543~547
- 4 Zhang Yongqiang, Chen Wuzhu, Zhang Xudong *et al.*. Synthetic evaluation and neural network prediction of laser cutting quality [C]. *SPIE*, 2004, **5629**: 237~246
- 5 Wang Qionge, Di Ruikun, Zhang Haitao. Application of three-dimensional laser cutting technology in space curve processing [J]. *Machinery*, 2005, (6): 36~38
王琼娥, 狄瑞坤, 张海涛. 三维激光切割技术在空间曲线加工中的应用[J]. *机械制造*, 2005, (6): 36~38
- 6 Tong Ming, Wang Wei, Yang Guang *et al.*. Do experiments to research affecting factors of laser cutting surface of the materials [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2010, (10): 121~123
佟明, 王维, 杨光等. 板材激光切割表面质量影响因素的实验研究[J]. *机械设计与制造*, 2010, (10): 121~123
- 7 Wang Binxiu, Teng Jie. Technical study on laser processing technology of the autoflow balancing valve spool [J]. *Electromachining & Mould*, 2009, (6): 54~57
王斌修, 滕杰. 自动流量平衡阀阀芯的激光加工工艺研究[J]. *电加工与模具*, 2009, (6): 54~57
- 8 Yang Wei, Peng Xinhan, Zhang Jun. Study of laser cutting technology for silicon wafer under water[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3064~3067
杨伟, 彭信翰, 张骏. 水下激光切割硅片的工艺研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3064~3067
- 9 Kou Shuqing, Wang Jinwei, Yang Shenhua *et al.*. Experimental study of pulse laser processing fracture notch of main bearing cap of crankcase bearing bracket [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2678~2683
寇淑清, 王金伟, 杨慎华等. 箱体主轴座脉冲激光加工裂解槽实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2678~2683
- 10 Meng Hongyun, Liao Jianhong, Guan Banggui *et al.*. Fiber laser cutting technology on coronary artery stent [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 733~736
蒙红云, 廖健宏, 官邦贵等. 心血管支架的光纤激光切割工艺[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 733~736
- 11 Chen Zhuo, Wang Jialing, Li Yutian *et al.*. Coronary stent precise laser cutting [J]. *Materials Review*, 2008, **22**(4): 112~115
陈卓, 王佳玲, 李雨田等. 冠状动脉支架激光精密切割[J]. *材料导报*, 2008, **22**(4): 112~115
- 12 Mei Lifang, Chen Genyu, Liu Xufei *et al.*. Three-dimensional laser cutting technology in auto-body panel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3308~3312
梅丽芳, 陈根余, 刘旭飞等. 车身覆盖件的三维激光切割工艺[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3308~3312