

文章编号: 1001-3806(2015)06-0850-04

## 线能量对奥氏体不锈钢激光焊接质量的影响

陈俊科, 石岩\*, 倪聪, 蒋士春, 刘佳  
(长春理工大学 机电工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 为了研究线能量对 304 奥氏体不锈钢激光焊接质量的影响, 采用高功率 Nd:YAG 激光器及焊接机器人对 304 奥氏体不锈钢薄板进行了激光焊接工艺试验, 并使用光学显微镜、显微硬度计、拉伸试验机等仪器重点研究了线能量对 304 奥氏体不锈钢激光焊接焊缝成形和力学性能的影响。结果表明, 线能量对焊缝成形、显微硬度及力学性能有较大影响, 接头显微硬度分布不均匀, 低功率时静拉伸强度最小值为 671.67MPa, 高功率时静拉伸强度最小值达 780MPa。

**关键词:** 激光技术; 奥氏体不锈钢; 激光焊接; 线能量; 焊缝成形; 力学性能

**中图分类号:** TG456.7      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.06.025

### Effect of heat input on welding quality of austenitic stainless steel

CHEN Junke, SHI Yan, NI Cong, JIANG Shichun, LIU Jia

(School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Science and Technology Changchun, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to study the influence of heat input on laser welding quality of 304 austenitic stainless steel, experiments were carried out by using high power Nd:YAG laser and welding robots. Weld appearance, microhardness and mechanical properties were analyzed with an optical microscope, a microhardness tester and a tensile testing machine. Experimental results show that heat input has great influence on weld appearance, microhardness and mechanical properties. Furthermore microhardness is different in different areas. The lowest tensile strength values of laser welding are 671.67MPa at low laser power and 780MPa at high laser power.

**Key words:** laser technique; austenitic stainless steel; laser welding; heat input; weld appearance; mechanical property

### 引言

奥氏体不锈钢具有耐腐蚀、耐高温、加工性能好等优点, 在工业生产中得到广泛应用, 其连接方法主要有焊条电弧焊、埋弧自动焊、熔化极惰性气体 (metal inert-gas, MIG) 保护焊、惰性气体钨极 (tungsten inert gas, TIG) 保护焊<sup>[1-3]</sup>。和以上焊接方法相比, 激光焊接具有热输入易控、热影响区小、热传导所致变形低; 不使用电极、无电极污染和损伤顾虑、无接触、损耗和变形低; 在焊接薄材时不会像电弧焊有回熔现象; 焊接精准、深宽比大等优点<sup>[4-6]</sup>, 因此激光焊接是焊接不锈钢薄板的理想焊接方法。但工艺参量对激光焊接质量的影响较大, 在不同的工艺参量下焊接质量可能会有较大差别<sup>[7-10]</sup>。本文中选用线能量作为复合表征量, 以 0.7mm 厚 304 奥氏体不锈钢为研究对象, 在高、低

两种激光功率下研究了线能量对奥氏体不锈钢激光全熔透焊接的焊缝成形及力学性能的影响, 为奥氏体不锈钢的激光焊接工艺提供研究数据和技术支持。

### 1 试验材料、设备及方法

#### 1.1 试验材料

试验材料采用 0.7mm 厚 SUS304 奥氏体不锈钢薄板, 其化学成分如表 1 所示。焊接试验样件尺寸为 120mm × 120mm, 试验前用丙酮擦拭样件, 除去样件表面的油污。

Table 1 Chemical composition (mass fraction) of austenite stainless steel

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
≤ 0.0008	≤ 0.010	≤ 0.020	≤ 0.00035	≤ 0.0003	0.080 ~ 0.110	0.180 ~ 0.190	balance

#### 1.2 试验设备及方法

试验中采用 HL4006D 型 4kW Nd:YAG 激光器和 KUKA 焊接机器人系统完成。图 1 为激光焊接过程示意图。焊接过程中不锈钢上下板均采用氩气保护, 分别在低功率和高功率条件下研究线能量对焊缝质量的影响。

焊接后将试样沿垂直焊缝方向切开取样, 经镶嵌、

基金项目: 吉林省科技支撑计划重点资助项目 (20120353)

作者简介: 陈俊科 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊接方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: shiyan@cust.edu.cn

收稿日期: 2014-12-26; 收到修改稿日期: 2015-04-06

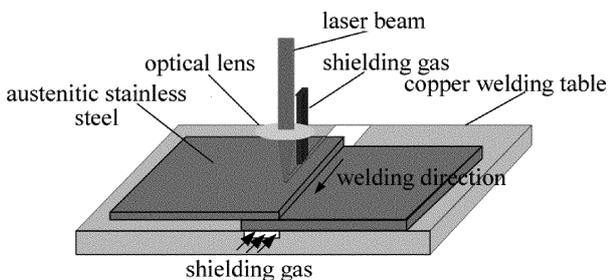


Fig. 1 Schematic diagram of laser welding

研磨、抛光制备成金相试样,使用三氯化铁盐酸水溶液(76mL 水 + 24mL 盐酸 + 6g 三氯化铁)腐蚀。采用 ME61 型体式显微镜测量焊缝熔宽,采用光学显微镜和 EVO18 型扫描电子显微镜观察焊缝宏观形貌、微观组织及断口形貌,采用 MH-60 型数字显微硬度计测量焊缝显微硬度,采用美国 MTS 公司生产的 810. 22M 电、液伺服材料试验系统进行拉伸试验。图 2 为拉伸试样示意图。

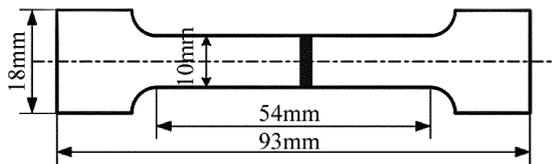


Fig. 2 Shape and size of a tensile specimen

## 2 试验结果与分析

### 2.1 线能量对焊缝成形的影响

试验中分别研究了低激光功率和高激光功率条件下线能量对焊缝成形的影响,研究表明,在不同激光功率条件下,线能量对焊缝成形的影响有很大差异。

图 3 和图 4 中分别为低功率条件下和高功率条件下焊缝截面形貌;图 5 和图 6 中分别为低功率条件下和高功率条件下线能量对焊缝正面熔宽、背面熔宽及熔合宽度的影响曲线。图中  $E$  为线能量。研究认为<sup>[11]</sup>,激光穿透焊由于熔池上下表面均存在等离子体的热辐射和熔池流动传热,当焊接热输入增加时,等离子体的热辐射和熔池流动传热都呈增强趋势,因此在一定范围随着线能量的增大,焊缝正背面熔宽及熔合宽度均呈增大趋势。但是当激光功率不同时,增大程度有所不同,在低功率(1.5kW)焊接时,随着线能量的增大,焊缝正、背面形貌变化较大;在高功率(3.0kW)焊接时,随着线能量的增大,焊缝正、背面熔宽相差较小,焊缝截面呈典型的双 Y 型,焊缝熔透稳定,成形良好。说明在高功率焊接时焊缝成形影响随线能量变化的波动较小,焊缝成形更加稳定,而且获得成形较好的焊缝所对应的线能量取值较小,因此可以实现高速焊接。但是在焊接时激光功率不宜过高,因为过高的功率会带来咬边、凹陷、飞溅等缺陷。

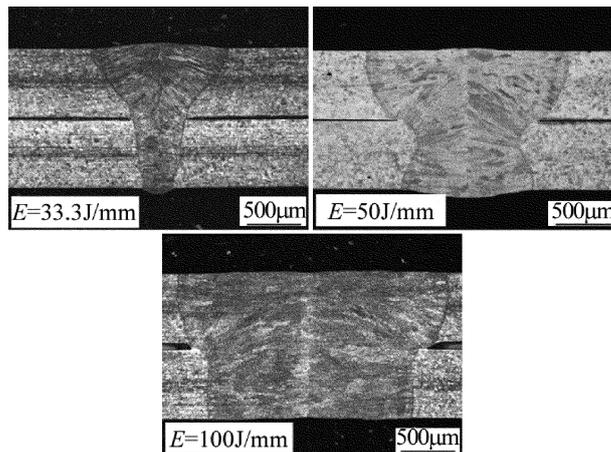


Fig. 3 Cross section of welding at low power

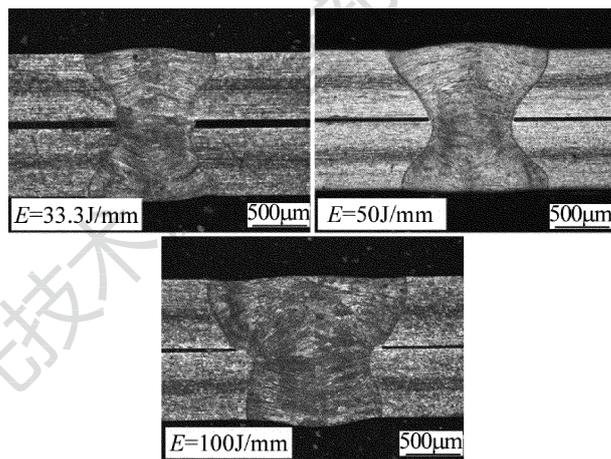


Fig. 4 Cross section of welding at high power

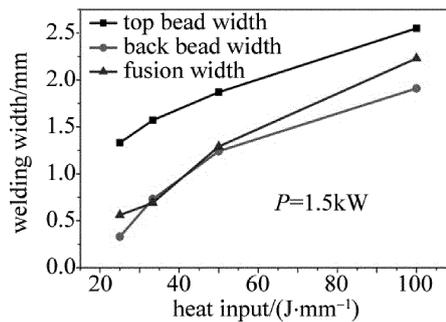


Fig. 5 Effect of heat input on welding width at low power

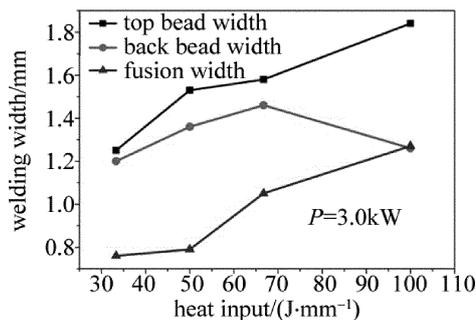


Fig. 6 Effect of heat input on welding width at high power

### 2.2 线能量对显微硬度的影响

分别对两组试验样件焊缝上板中央的显微硬度进

行了测试,载荷 200g,保载时间 10s,隔 0.1mm 采样一次。测试结果显示,接头显微硬度以焊缝中心为轴线呈对称分布,母材和焊缝的显微硬度基本一致,而过渡区附近显微硬度呈上升趋势,在过渡区达到最大值,如图 7 所示。图 8 为激光功率为 3.0kW、焊接速率为 0.045m/s 时焊缝显微硬度分布曲线。研究认为,奥氏体不锈钢母材和焊缝晶粒较过渡区晶粒粗大,图 8a、图 8b 和图 8c 分别为母材、过渡区、焊缝微观组织。由晶粒尺寸与显微硬度的关系可知,晶粒越细小,晶界就会越多,对位错移动的阻碍能力就会越强,因此抵抗塑性变形的能力增大,从而使该区域显微硬度增高<sup>[12-13]</sup>。

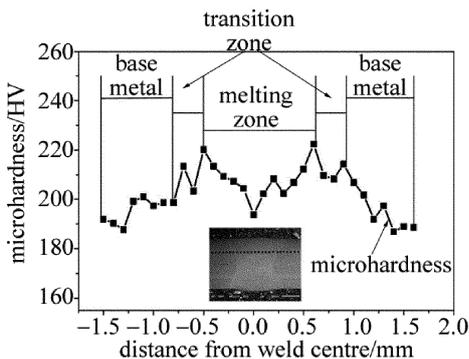


Fig. 7 Microhardness curves of welding joint

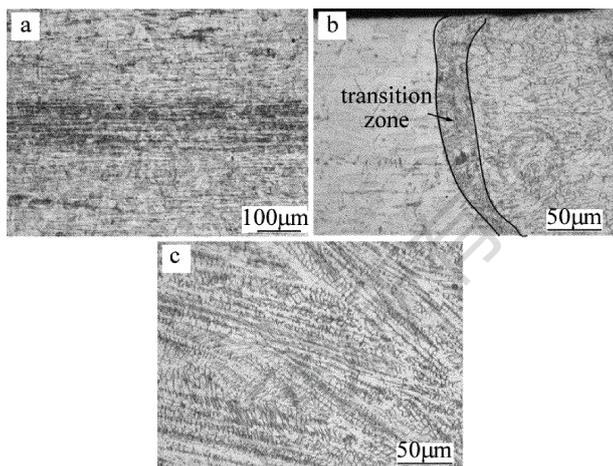


Fig. 8 Microstructure of welding joint

图 9 是线能量对不同激光功率焊接接头显微硬度

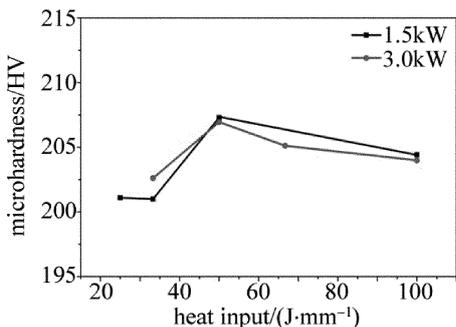


Fig. 9 Effect of heat input on microhardness

的影响曲线。由图可见,随着线能量的增大,焊缝显微硬度呈先增大后减小趋势。在线能量较低时,由于焊接热输入不足导致接头显微硬度较低;当线能量增大时,焊接热输入逐渐增大,从而显微硬度呈增大趋势;当显微硬度增到一定程度后,继续增大线能量会使焊缝热量输入增大,冷却速率减小,焊缝凝固结晶后得到焊缝组织晶粒尺寸增大,导致焊缝显微硬度减小。

### 2.3 线能量对接头静拉伸强度性能的影响

分别测试了两组试验样件的静拉伸性能,由于熔合宽度的大小会导致断裂方式的不同,而这种断裂方式按定义分别为拉伸和剪切,本文中为了统一说法,均定义为接头静拉伸强度。测试结果显示,接头低功率时静拉伸强度最小值为 671.67MPa,高功率时静拉伸强度最小值达 780MPa,焊缝断裂方式有母材断裂和焊缝断裂,焊缝断裂均位于熔合线附近。此区域在焊接过程中处于和母材、熔池接触的半熔化状态,其性能与焊缝有一定的差别,是接头的薄弱环节。

图 10 所示为线能量对接头静伸强度的影响曲线。由图可见,随着线能量的增大,焊缝熔合宽度增大,因此接头静拉伸强度呈增大趋势,当静拉伸强度增大到一定值时,随着线能量的增加,静拉伸强度趋于平稳趋势,这与线能量对焊缝熔合宽度的影响趋势并不完全一致。图 11 为在线能量相同时激光功率对接头静拉伸强度大小的影响。由图可以看出在线能量相同的条件下,激光功率更高时焊缝静拉伸强度值更大。

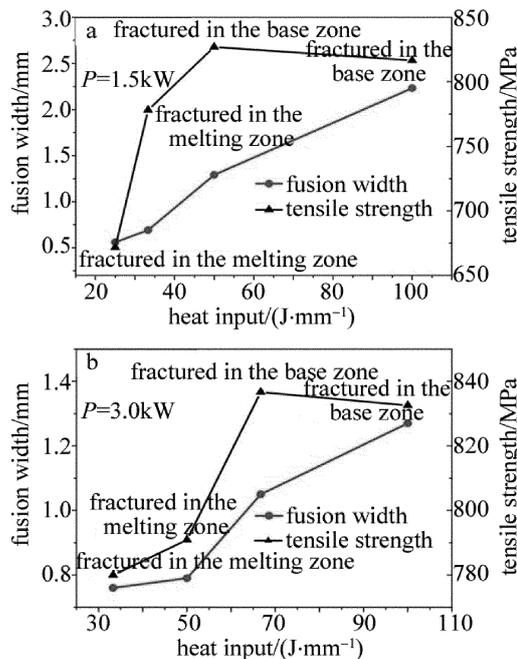


Fig. 10 Effect of heat input on tensile strength

图 12a 和图 12b 分别为焊缝断裂和母材断裂宏观形貌,图 12c 和图 12d 为焊缝断裂样件的微观形貌。由图可以看出,焊缝断口为大小不一的等轴韧窝,是典

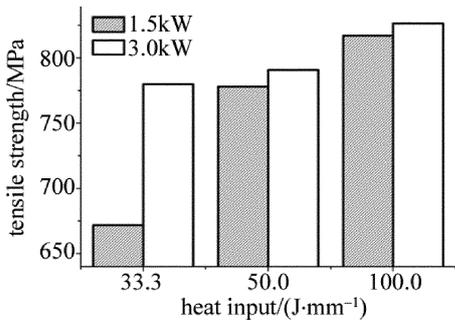


Fig. 11 Effect of laser power on tensile strength

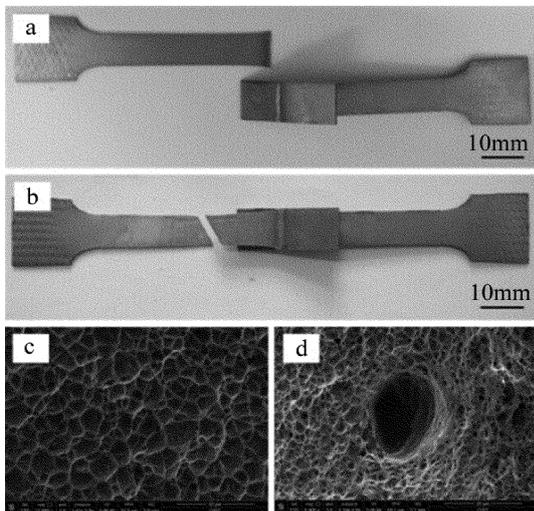


Fig. 12 Morphology of tensile fracture

型的韧性断裂。韧窝的形状主要取决于应力状态,在正应力的作用下形成等轴韧窝。韧窝的形成过程为材料内部分离形成空洞,在滑移的作用下空洞逐渐长大,并和其它空洞连接起来就形成了韧窝断口。由图 12d 可知,焊缝内存在气孔缺陷,由于气孔产生不仅影响焊缝的致密性,而且还会减小焊缝的有效工作面积,造成局部应力集中,从而降低了焊缝的力学性能,是导致焊缝断裂的原因之一。

### 3 结论

(1)不同的激光功率条件下,线能量对焊缝成形的影响不尽相同,低功率焊接时,焊缝成形随线能量变化的波动较大;在高功率焊接时,焊缝成形随线能量变化的波动较小,且获得良好焊缝形貌所需要的线能量更低,在焊接时可选择高功率高速焊接。

(2)焊缝显微硬度分布不均匀,随着线能量的增大,焊缝显微硬度呈先增大后减小趋势。激光焊接奥氏体不锈钢接头拉伸性能良好,断裂方式为韧性断裂。

随着线能量的增大,接头静拉伸强度呈增大趋势,当静拉伸强度增大到一定值时趋于稳定,这与线能量对焊缝熔合宽度的影响趋势并不完全一致。

### 参 考 文 献

- [1] LIU J, ZHANG H, SHI Y. Technology optimizing research on laser non-penetration lap welding of stainless steel based on design-expert V7[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(16): 52-60 (in Chinese).
- [2] LIU J. Laser welding technology and clamping control system design for plate heat exchanger [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013: 3-8 (in Chinese).
- [3] SHI Y, LIU J, ZHANG H. Study on deep penetration laser welding of 20Cr2Ni4A-20g dissimilar steel by slab CO<sub>2</sub> laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 0603011 (in Chinese).
- [4] ZHANG L J, ZHANG J X, CAO W J. Effect of welding parameters on weld geometry on pulsed Nd: YAG laser/TIG hybrid welding process of 304 stainless steel[J]. Transactions of China Welding Institution, 2011, 32(1): 33-36 (in Chinese).
- [5] WANG W, CHEN L, ZHAO X K. Effect of welding parameters on formation of welds during laser welding of NiTi shape memory alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(2): 291-296 (in Chinese).
- [6] WU Sh K, XIAO R Sh, CHEN K. Laser welding of heavy section stainless steel plants [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2422-2425 (in Chinese).
- [7] XU L, LIU X X, LI Q F, et al. Process study on laser welding of high strength galvanized steel with powder filling[J]. Laser Technology, 2014, 38(1): 1-5 (in Chinese).
- [8] LI J M, WANG Ch M, YAN F, et al. Study on microstructure and mechanical properties of 6005A joint in laser-MIG hybrid welding [J]. Laser Technology, 2014, 38(6): 733-737 (in Chinese).
- [9] YU Zh H, YAN H G, GUAN Zh G, et al. Effects of laser welding parameters on weld appearance and cracking tendency of high strength magnesium alloy [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013(6): 1479-1488 (in Chinese).
- [10] SHAN J G, LEI X, TAN W D, et al. Welding modes and weld formation characteristics of CO<sub>2</sub> laser welding of wrought magnesium alloy AZ31B[J]. Transactions of China Welding Institution, 2008, 29(4): 9-12 (in Chinese).
- [11] XU F, YANG J, GONG Sh L, et al. Effect of heat input on weld appearance of fiber laser beam full penetration welding aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(12): 1203001 (in Chinese).
- [12] ZHONG J M, WANG Zh H, NIE D J, et al. Influence of grain size on mechanical properties of isostatically pressed beryllium materials [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2000, 10(2): 228-231.
- [13] LI H B, JIANG Zh H, ZHANG Z R. Effect of grain size on mechanical properties of nickel free high nitrogen austenitic stainless steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2009, 16(1): 58-61.