

大功率光纤激光厚板自熔焊焊缝表面质量改善研究

陈根余 周 宇 张明军 陈晓锋 廖生慧

(湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要 在高功率光纤激光焊接厚度为 12 mm 的 SUS 304 不锈钢板的过程中, 熔池无法在其自身重力、表面张力、蒸气反冲力等作用力的共同作用下保持动态平衡, 熔池内液态金属流动剧烈, 使得穿透焊时焊缝表面成型质量较差, 容易出现飞溅、表面塌陷以及底部驼峰等焊接缺陷的问题。在确定焊接功率及正面保护种类及气流量等工艺参数的情况下, 采用改变单一变量的方法, 讨论了焊接速度、离焦量、背面保护气流量以及对接间隙的变化对焊缝表面质量的影响。结果表明: 合理的工艺措施可有效改善焊缝质量, 优化参数后的焊缝表面光滑、均匀, 后续加工量小。拉伸试验表明韧性断裂发生在母材处, 而且远离焊缝, 最大拉伸应力为 809 MPa, 对应的应变为 64%。

关键词 激光技术; 激光焊接; 厚板自熔焊; 焊接缺陷

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1103011

Study on Improving Surface Quality of Weld of Autogenously Laser Welding of Thick Plate with High Power Fiber Laser

Chen Genyu Zhou Yu Zhang Mingjun Chen Xiaofeng Liao Shenghui

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract In the process of autogenously welding of SUS 304 stainless steel plate with 12-mm thickness using high power fiber laser, because the welding pool can not maintain homeostasis in the combined action of gravity, surface tension and vapor recoil, the flow of the liquid metal in the molten pool is drastic and the poor formation is easy to cause welding defects of its surface such as spatters, surface undercut and root hump. With certain welding power and top protection gas with certain flow rate, the influences of the welding speeding, defocus, butt joint gap and the flow rate of bottom shielding gas on welding quality by changing the single variable are discussed. The results show that adopting some reasonable technology measures can efficiently improve the welding quality, make the welding surface smooth and well-distributed, and reduce following machining amount after being welded. Tensile test shows that ductile fracture happens in parent metal place, far away from the weld. The maximum tensile stress is 809 MPa, and the mechanical performance of the weld is good.

Key words laser technique; laser welding; thick plate welding; welding defect

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 350.3390

1 引 言

高功率光纤激光焊接厚板时功率密度可达 $10^6 \sim 10^8$ W/cm², 对于如此高能量输入和高功率密度的激光焊接过程中, 熔池及小孔在液态金属的重力、表面张力以及蒸气反冲力的共同作用下, 表现极不稳定, 以致大型复杂结构件厚板的超高功率光纤激光熔透焊接焊缝难以成型, 容易产生表面塌陷、底部驼峰、飞溅等焊接缺陷, 不仅影响焊缝美观, 增加后续加工的

工作量, 而且影响了焊缝力学性能。目前国内外学者对超高功率光纤激光器不锈钢厚板焊接的熔池现象及常见缺陷进行了试验观测^[1-3], 但基本上研究考察的都是未焊透时的焊接过程, 对实际生产需要的熔透焊未进行有效研究。吴世凯等^[4]采用 20 kW 快轴流 CO₂ 激光器对 12 mm 不锈钢厚板焊接进行了试验研究。迄今为止, 国内较少见厚板超高功率光纤激光熔透焊接缺陷的研究报道。

收稿日期: 2013-06-03; 收到修改稿日期: 2013-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(51175165), 国家科技重大专项(2013ZX04001131)

作者简介: 陈根余(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: hdgychen@163.com

在对厚度为 12 mm 的 SUS 304 不锈钢板的高功率激光焊接过程中表面缺陷产生的原因所做研究的基础上,本文在确定焊接功率及背面保护气流量的情况下,采用改变单一变量的方法,讨论了离焦量、焊接速度、背面保护气流量对改善焊缝表面质量的影响。试验研究表明,合理的工艺措施,可有效改善焊缝质量,使焊缝表面光滑、均匀,焊接后续加工量小。拉伸试验表明焊缝力学性能良好,焊缝强度甚至高于母材。

表 1 试验材料的化学成分及含量(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of the 304 stainless steel (mass fraction, %)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N	Fe
0.07	2.00	0.045	0.03	0.075	18.28	8.15	0.1	Bal.

表 2 实验参数

Table 2 Parameters of the experiments

Parameter	Value
Welding speed / (m/min)	1.2, 1.5, 1.8, 2.1, 2.4
Defocus / mm	-10, -5, 0, +5, +10
Bottom shielding gas flow / (L/min)	5, 10, 20, 30
Butt joint gap / mm	0.01, 0.04, 0.07, 0.1

试验装置如图 1 所示,焊接过程如图 2 所示。焊接设备是 IPG 公司的 YLS-10000-CW 型光纤激光器,最大输出功率为 10 kW,输出模式为 TEM₀₀,输出能量近似于高斯分布,输出光束波长为 1070 nm。激光能量通过光纤传递,光纤直径为 300 μm,激光在光纤末端经过焦距为 150 mm 的准直镜后变为平行光,在焦距为 200 mm 的聚焦镜聚焦作用之后,得到焦点处的光斑直径为 0.4 mm,焦点处功率密度高达 8×10⁶ W/cm²。配合德国 KUKA 六轴联动机器人进

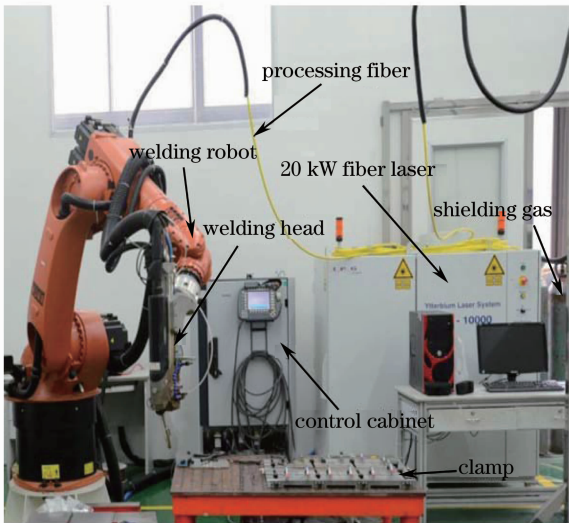


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental setup

2 试验材料和设备

试验材料为厚度为 12 mm 的 SUS 304 不锈钢板,它是一种典型的激光焊接材料,用途广泛,相当于我国的牌号为 0Cr19Ni10 不锈钢,化学成分如表 1 所示,材料尺寸为 40 mm×40 mm×12 mm。焊接过程中固定参数为:功率为 10 kW,背面保护气为 Ar,正面保护气为 N₂,正面保护气流量为 20 L/min。参数变化如表 2 所示。

行焊接试验。试验前将试件对接面打磨平整,保证精确、均匀的对接间隙。为了尽可能避免油污影响焊接质量,焊前用丙酮清洗焊接部位,去除油污。

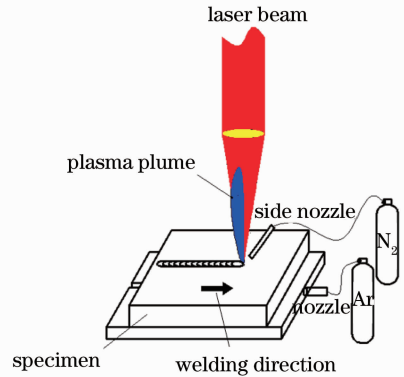


图 2 深熔焊接示意图

Fig. 2 Schematic of deep penetration laser welding process

3 试验结果与分析

3.1 试验参数对焊缝形貌的影响

3.1.1 焊接速度

图 3 为不同焊接速度时焊缝上下表面及纵截面,图中 h 为表面塌陷深度。其他工艺参数:焊接功率为 10 kW,离焦量为 -10 mm,表面保护气为 N₂,流量为 20 L/min,采用侧吹保护气方式。从图中可以看出,在速度为 1.2 m/min 变化到 2.1 m/min 过程中,试件表面飞溅都较少,但基本上都出现表面塌陷,并伴随着不同体积大小的底部驼峰。在焊接速度为 2.4 m/min 时,试件未焊透,试件无明显的表面塌陷,但会形成表面飞溅,而且焊缝表面出现凸起,这可能是因为在未焊透时,焊后表面熔池的温度差引起表面张力梯度,使得液态金属向后流动,液态

金属还来不及向焊接方向回流就已经冷却凝固,形成凸起。随着速度从 1.2 m/min 增大到 2.4 m/min

过程中,激光能量密度逐渐减小,试件塌陷的最大深度及平均深度都在逐渐减小。

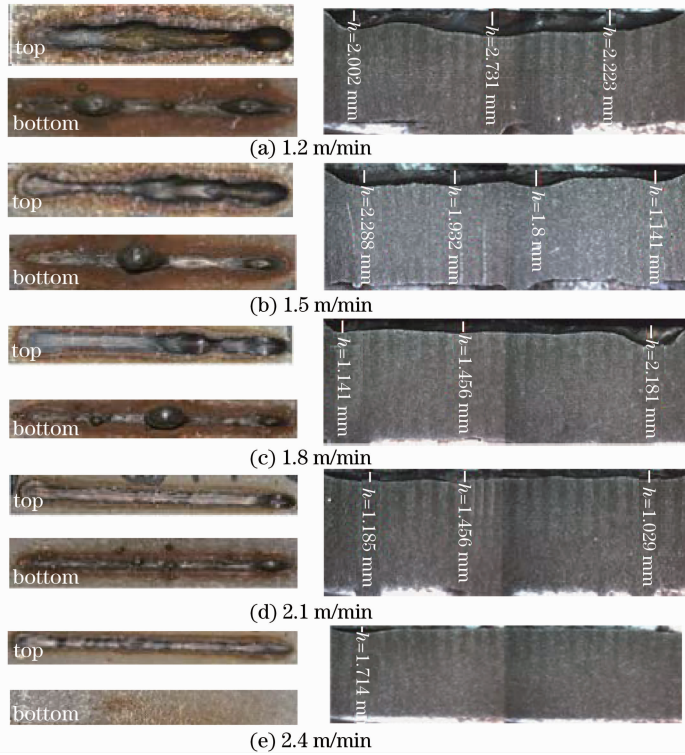


图 3 不同焊接速度时焊缝上下表面(左列)及纵截面(右列)

Fig. 3 Surface appearances (left) and longitudinal sections (right) of weld at different welding speeds

适度穿透焊接过程中熔池内部流动如图 4 所示, Golubev^[5]关于小孔形状的试验观测和仿真分析以及张屹等^[6-7]对高速焊接过程中小孔形状的拍摄都比较清晰直观地观察到小孔前沿存在一定的倾斜角度,且小孔前沿壁上存在移动的“凸台”。从图 4 中可以看出,此时小孔前沿液态金属不仅受到自身重力,而且还受到孔内巨大的蒸气反作用力,孔内蒸气反作用力通过作用于小孔前沿的“凸台”,促使小孔前沿熔池高速向下流动, Eriksson 等^[8]通过实验测得小孔前沿液态金属向下流速高达 7 m/s, 此时金属熔池无法在表面张力,自身重力,蒸气反作用力

等力的共同作用下维持动态平衡,小孔前沿液态金属快速向下喷出,会造成熔池大量损失。

随着焊接速度增大,小孔壁上的“凸台”会逐渐变小。此时前沿孔壁受到沿小孔轴向的作用力较小,而且由于焊接速度增大导致的熔融金属也减少,液态金属重力较小,因此小孔前沿液态金属的流速会变慢,小孔前沿液态金属从试件背部喷出的速率减小,熔池损失减小,形成的表面塌陷平均深度也会随着降低。但是在焊接速度从 1.2 m/min 到 2.4 m/min 变化过程中,激光能量密度都比较大,熔化金属较多,熔池内部的表面张力梯度引起的 Marangoni 对流无法克服熔滴重力,使得液态金属逐渐在工件底部积累,液态金属继续长大,逐渐聚集成直径较大的珠状金属熔滴,而此时表面张力无法完全克服熔滴重力的作用,熔滴再也无法全部被拉回工件内部熔池中,当珠状液滴积累到一定体积或质量不再增大时,会慢慢冷却凝固形成底部驼峰^[9]。

综上所述,单一改变焊接速度并不能得到熔透和未熔透的临界状态,虽然很大程度上影响焊缝表面塌陷深度,但并不能得到较好的焊缝效果。

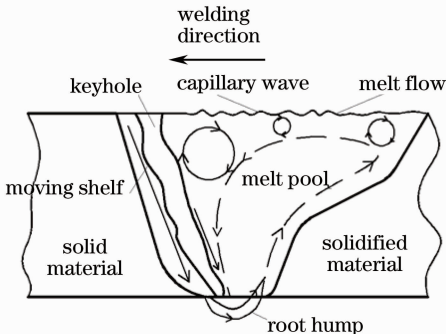


图 4 熔池内部流动示意图

Fig. 4 Schematic of the moving of the melt pool

3.1.2 离焦量

图 5 为不同激光焦点位置偏移量即离焦量从负(焦点位置在工件上表面以下)变化至正(焦点位置在工件上表面以上)时焊缝形貌,其他工艺参数:焊接功率为 10 kW,焊接速度为 1.5 m/min,正面表面保护气为 N₂,流量为 20 L/min,采用侧吹保护气方式。由图可以看出,试件在正离焦及零离焦量焊接时并未熔透,而在负离焦量焊接时实现了熔透焊接,即在离焦量为 -5 mm 时出现了较大的表面塌陷。这是因为改变离焦量会影响试件表面光斑尺寸,并改变了到达试件表面及小孔内的能量密度,当离焦量为负的时候,激光作用于工件表面的能量密度较高,输入工件内部的激光能量较大,具有很好的穿透试件能力,但是随着焦点位置上移,由于光束聚焦位置远离工件表面,激光能量密度逐步降低,这样主要的激光能量集中在工件的上表面,试件下表面能量密度不够,无法实现穿透焊,从而影响了焊缝质量。

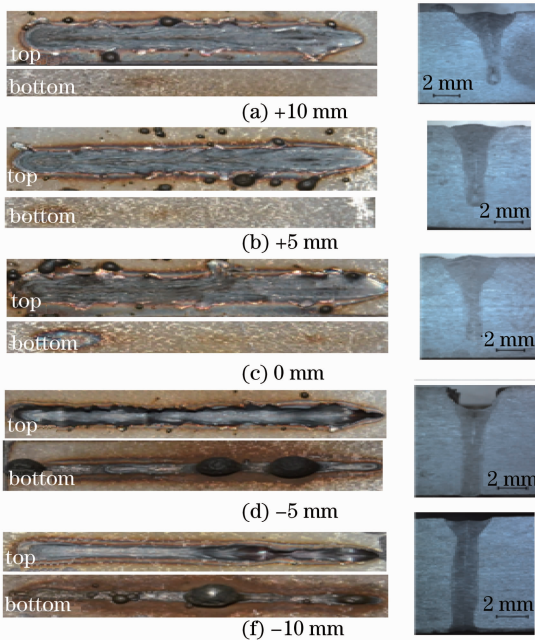


图 5 不同离焦量时焊缝表面形貌和截面
Fig. 5 Surface appearances and cross sections
at different defocus distances

从图 5 还可以看出,相对于离焦量为正时的焊缝形貌,当离焦量为负时,焊缝表面飞溅明显较少,焊缝表面较光滑,而焊缝背部则出现驼峰。这主要是因为,在正离焦焊接时,试件未熔透,小孔内蒸气反作用力较大,且金属蒸气只能向上喷出,从而熔池内的液态金属在蒸气剪切力的作用下向外飞出,形成表面飞溅。而在负离焦实现穿透焊接时,小孔前沿

的液态金属在金属蒸气的反作用力下沿小孔轴向向下高速流动,一部分液态金属从背部喷出,另一部分在试件背部积累形成底部驼峰。因此改变离焦量焊接时,不仅影响了激光穿透工件的能力,而且很大程度上影响了焊缝形貌。

3.1.3 背面保护气流量

图 6 为不同背面保护气流量时的焊缝形貌,其他工艺参数:焊接功率为 10 kW,焊接速度为 1.5 m/min,离焦量为 -10 mm,正面表面保护气为 N₂,流量为 20 L/min,采用侧吹保护气方式。由图 5 可以看出,在无背面保护气时,试件背部出现底部驼峰,直径可以高达 5 mm,且由图 5 中离焦量为 -10 mm 时焊缝形貌可以看出,底部驼峰产生之后,表面塌陷也开始变得比较严重,这主要是因为大功率激光焊接厚板时,功率密度较大,熔化金属较多,导致了金属熔滴在背部形成之后其冷却时间较长,使得金属熔滴对后续焊接过程中背部熔池存在持续的吸引力,其自身逐渐长大又延长了熔滴的凝固时间,以致金属熔滴在完全冷却形成底部驼峰之前的张力作用对背部熔池 20 mm 以上的流动都会产生影响。由图 6 可以看出,当背面保护气从无到有时,底部驼峰慢慢开始减小直至消失,背部焊缝变为比较均匀的凸起,焊缝表面也没有出现较明显的表面塌陷及飞溅。这主要是因为在线能量密度适当的情况下,实现穿透焊接,液态金属也没有大量的从试件背部喷出,而背面保护气在很大程度上加速了底部熔池的冷却凝固,使其无法再继续长大,也不再对后续

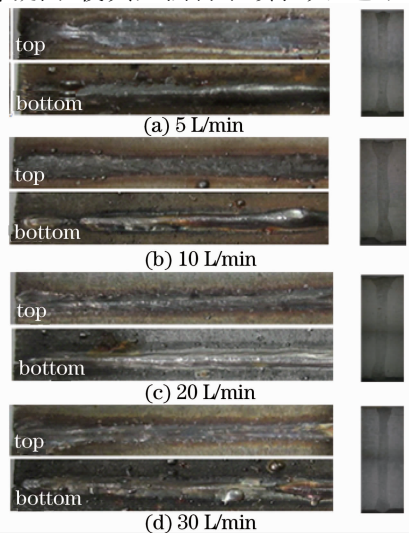


图 6 不同背面保护气流量时的焊缝形貌(左列)和
截面(右列)
Fig. 6 Surface appearances (left) and cross sections
(right) at different bottom shielding gas flows

的焊接过程中熔池的流动产生影响。而背面保护气能在一定程度上改变熔池内部表面张力的的大小,表面张力增大会克服熔滴重力作用,促使背部的金属熔滴向熔池内部流动,熔池背部流动方向如图4所示。而随着背面保护气流量的继续增大,试件背部的均匀凸起仍然存在,且减小趋势并不明显,这可能是是因为不锈钢焊接过程中,发生组织转变,熔池的体积变大,即使没有表面塌陷,焊缝背部仍然有凸起。

3.1.4 对接间隙

图7为不同对接间隙焊接时的焊缝形貌,其他工艺参数:焊接功率为10 kW,焊接速度为1.8 m/min,离焦量为-8 mm,背面保护气为Ar,流量为5 L/min,正面表面保护气为N₂,流量为20 L/min,采用侧吹保护气方式。由图可以看出,当对接间隙为0.01 mm时,底部的均匀凸起仍然比较严重,凸起高达0.8 mm,随着对接间隙增大到0.04 mm的过程中,在对焊缝上表面质量没有影响的情况下,背部的均匀凸起逐渐变小直至消失,此时焊缝上下表面焊缝平整,宽度基本一致,且焊缝光滑均匀;当对接间隙继续增大时,焊缝质量开始变差,以致于对接间隙达到0.10 mm时,焊缝表面塌陷比较严重,无法实现较好的连接。这是由于在激光焊接过程中,焊缝区域晶粒细化,导致焊缝区域体积变大,而增加适当的对接间隙,不但有利于熔池的流动,而且可以消除因焊缝组织变大引起的表面凸起,而当对接间隙过大时,不但容易产生激光能量损失,而且会因熔融金属无法填满焊缝间隙而导致焊缝塌陷。因此,适当改变试件的对接间隙可以有效地减少底部的凸起。

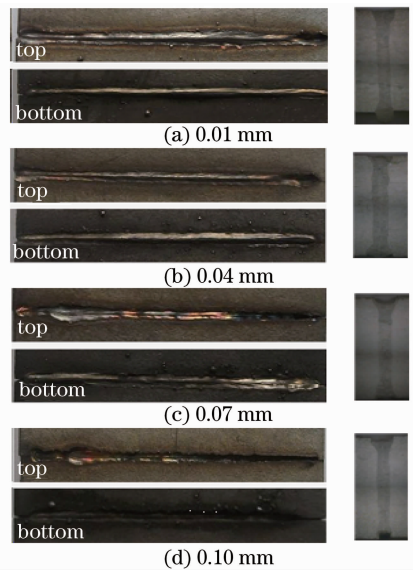


图7 不同对接间隙焊接时的焊缝形貌(左列)和截面(右列)

Fig. 7 Surface appearances (left) and cross sections (right) at different butt joint gaps

3.2 参数优化后焊缝的性能测试

3.2.1 优化参数后焊缝成型

在前面研究的基础上,光纤激光对厚度为12 mm的304不锈钢板自熔对接焊焊接的优化工艺参数为:激光功率为10 kW,离焦量为-8 mm,焊接速度为1.8 m/min,正面保护气为N₂,流量为20 L/min,背面保护气为Ar,流量为5 L/min,对接间隙为0.04 mm。焊缝形貌如图8所示,从图中可以看出,焊缝正面及背面成型比较均匀,焊缝较窄且上下表面焊缝宽度基本一致,焊缝上下表面都没有产生飞溅缺陷,也不再产生表面塌陷及底部驼峰等焊接缺陷,焊缝接头横截面呈“I”字型,实现了良好的焊接效果。

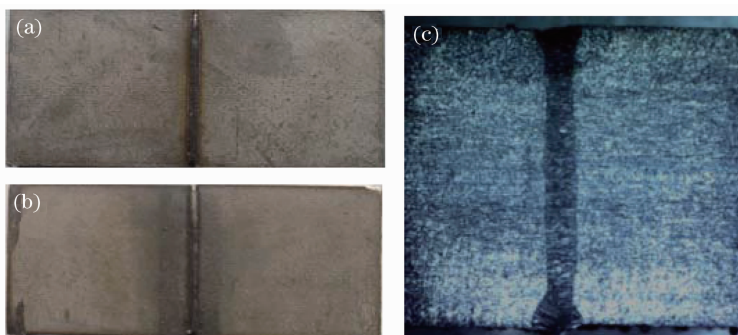


图8 焊缝形貌。(a) 焊缝正面;(b) 焊缝背面;(c) 焊缝截面

Fig. 8 Welding appearance. (a) Top appearance; (b) bottom appearance; (c) cross section

3.2.2 焊缝接头的拉伸性能

图9为按照GB/T 228-2002要求对焊缝接头线切割成标准拉伸试件尺寸,其中 F 为拉伸力, R

为半径。为了使拉伸试验过程中压块和试件之间不至于产生相对滑动,试件两端为机械加工的沟槽,如图10(a)所示。对优化参数后的焊缝进行拉伸试

验,图 10(b)为试件拉伸变形及试件发生韧性断裂的位置。图 11 为试件拉伸过程的应变—强度曲线。由图可以看出,试件断裂发生在远离焊缝的母材处,

且母材最大的拉伸强度高达 809 MPa,此时试件的屈服应变为 64%。由此可知,焊缝力学性能良好,焊缝的最大拉伸强度高于母材,满足实际工程需求。

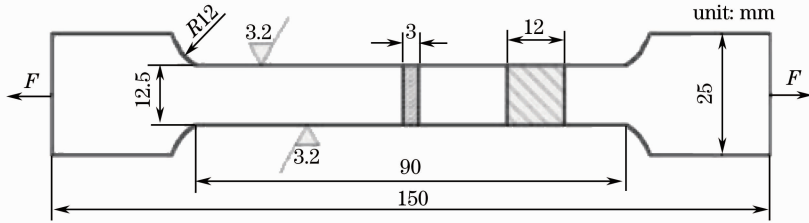


图 9 拉伸标准件示意图

Fig.9 Schematic illustration of transverse tensile test sample



图 10 拉伸试件及断裂图。(a) 未拉伸试件;
(b) 拉伸后断裂试件

Fig.10 Samples of the tensile test. (a) Untested sample;
(b) tested sample

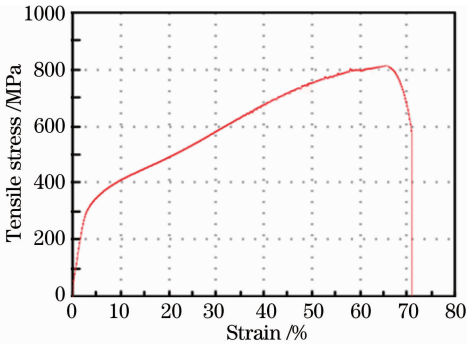


图 11 拉伸应力应变曲线

Fig.11 Tensile stress-strain curve of the butt joint

4 结 论

1) 随着焊接速度的增大,激光能量密度减小,表面塌陷平均深度也逐渐降低,但是单一改变焊接速度并不能得到熔透和未熔透的临界状态,熔透时产生表面塌陷时表面飞溅较少,而未熔透时表面飞溅较多,仅改变焊接速度并不能得到较好的焊缝效果。

2) 激光焊接时负离焦与正离焦相比具有更好的穿透工件的能力。

3) 在无背面保护气进行焊接时,试件背部产生底部驼峰之后,表面塌陷也开始变得比较严重,对焊接试件进行背面保护,有利于加速背部熔滴冷却凝

固,从而抑制底部驼峰的形成。

4) 适当的改变对接间隙有利于消除底部凸起,使得焊缝上下表面均匀,减小后续加工量。

5) 优化参数后的焊缝接头拉伸强度高于母材的 809 MPa,材料的塑性应变为 64%,焊缝力学性能良好。

参 考 文 献

- Seiji Katayama, Yousuke Kawahito, Masami Mizutani. Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects[J]. Physics Procedia, 2010, 5: 9-17.
- Cui Haichao, Lu Fenggui, Tang Xinhua, et al.. Experimental research on fluidity of laser welded molten pool[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603004.
- 崔海超, 芦凤桂, 唐新华, 等. 激光焊接熔池流动性试验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603004.
- Hu Changkui, Chen Peifeng, Liang Jun. The technics study of laser welding thick plate[J]. Applied Laser, 2003, 23(5): 268-270.
- 胡昌奎, 陈培锋, 梁 军. 激光焊接钢厚板的工艺研究[J]. 应用激光, 2003, 23(5): 268-270.
- Wu Shikai, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser welding of heavy section stainless steel plants[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2422-2425.
- 吴世凯, 肖荣诗, 陈 铠. 大厚度不锈钢板的激光焊接[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2422-2425.
- V S Golubev. Possible hydrodynamic phenomena in deep penetration laser channels[C]. SPIE, 2000, 3888: 244-253.
- Zhang Yi. The Simulation Research on the Keyhole Effect of Deep Penetration Laser Welding Based on a Novel "Sandwich" Method[D]. Changsha: Hunan University, 2005.
- 张 屹. 基于“三明治”新方法的激光深熔焊接小孔效应的模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- Pang Shengyong. A Study on the Transient Keyhole and Moving Weld Pool Behaviors and Mechanisms of Deep Penetration Laser Welding [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- 庞盛永. 激光深熔焊接瞬态小孔和运动熔池行为及相关机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- I Eriksson, J Powell, A F H Kaplan. Measurements of fluid flow inside laser welding keyholes[J]. Join Weld Sci Technol, 2011, 16(7): 636-641.
- Torbjörn Ilar, Ingemar Eriksson, John Powell, et al.. Root humping in laser welding-an investigation based on high speed imaging[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 27-32.

栏目编辑: 宋梅梅