

文章编号: 1001-3806(2007)05-0489-04

## 316L 不锈钢激光-钨极惰性气体复合焊接工艺研究

严 军<sup>1</sup>, 曾晓雁<sup>1\*</sup>, 高 明<sup>1</sup>, 邓业平<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074; 2. 安琪酵母股份有限公司, 宜昌 443003)

**摘要:** 为了进一步提高 316L 不锈钢的可焊性, 采用 Rofin Sinar 5kW 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器和 Miller 钨极惰性气体 (TIG) 焊机, 对 3mm 厚 316L 不锈钢进行了一系列 CO<sub>2</sub> 激光-TIG 电弧复合焊接工艺试验, 研究了激光功率、电弧电流、热源间距等工艺参数对焊缝成型的影响规律。在激光功率大于 2.5kW 时, 会产生小孔效应, 其对复合焊接熔深影响显著; 而当电弧电流小于 150A 时, 焊接熔宽与两热源的热输入关系密切, 当电流大于 150A 时, 仅电弧电流是焊接熔宽的决定性因素; 热源间距存在一个最佳值 2mm~3mm, 此时, 焊接熔深可提高 1.46 倍~2.54 倍。研究结果表明, 复合焊接提高了 316L 不锈钢的可焊性。

**关键词:** 激光技术; 复合焊接; 钨极惰性气体焊接; 激光焊接

**中图分类号:** TG665 **文献标识码:** A

### Technics research of hybrid laser-TIG welding of 316L stainless steel

YAN Jun<sup>1</sup>, ZENG Xiaoyan<sup>1</sup>, GAO Ming<sup>1</sup>, DENG Yeping<sup>2</sup>

(1. National Engineering Research Center for Laser Processing Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Angle Yeast Co. Ltd., Yichang 443003, China)

**Abstract** A serious experiment of CO<sub>2</sub> laser-tungsten inert gas (TIG) arc hybrid welding was used to weld the 316L stainless steel with Rofin Sinar 5kW CO<sub>2</sub> laser and Miller TIG welding machine. The effect of various parameters such as laser power, arc current and the laser-arc distance on the welding shape was studied in detail. The result showed that there was a "key hole" when the laser power was above 2.5kW, which dominantly affected the weld penetration; the weld width was relative to the power of the laser and energy of the arc when the arc current was less than 150A, but the weld width was determined by the energy of the arc only when the arc current was larger than 150A. There was an optimal laser-arc distance (2mm~3mm), with which the weld penetration can be improved to 1.46 times~2.54 times. The research shows that the hybrid welding can improve the weldability of 316L stainless steel.

**Key words** laser technique; hybrid welding; tungsten inert gas welding; laser welding

## 引 言

当前, 工业焊接生产中常用的钨极惰性气体 (tungsten inert gas, TIG) 焊接工艺具有焊缝成型质量好的优点, 但也具有单道焊接熔深浅、热影响区大、对材料成分的变化敏感、生产效率低的缺点<sup>[1]</sup>。激光束焊接能够在较高的焊接速度及较低的热输入下, 获得深而窄的焊接接头, 但也具有对焊缝间隙敏感、高功率激光器成本较高等缺点。激光-电弧复合焊接充分发挥了这两种热源各自的优势, 又互补了各自的不足, 具有熔深大、高工艺稳定性、高焊接速度、小焊接变形和高的缝隙桥接能力等突出优点, 因而在工业领域中受到越来越多的重视<sup>[2]</sup>。

**作者简介:** 严 军 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊接与激光-电弧复合焊接研究。

\* 通讯联系人。E-mail: xyzen@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2006-07-07; 收到修改稿日期: 2006-09-26

316L 不锈钢具有优良的耐酸、耐蚀性能, 在工业应用中十分普遍, 其含碳量低、焊接性能好, 但导热系数小、线膨胀系数大<sup>[3]</sup>。传统的焊接方式是采用 TIG 小电流, 快速多层焊, 接头在冷却过程中会形成较大的拉应力, 易变形, 甚至会产生热裂纹<sup>[4]</sup>。而激光-TIG 复合焊接具有焊接速度快、能量集中、单道成型等优点, 能够有效降低焊缝的热应力<sup>[5]</sup>。但采用激光-TIG 复合焊接工艺进行 316L 不锈钢焊接的研究还不多见, 对此, 结合实际应用需求, 作者系统研究了 316L 不锈钢的激光-TIG 复合焊接工艺及其焊缝成型规律。

## 1 试验设备与方法

试验中采用 Rofin Sinar 5kW 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器和 Miller TIG 焊机。其参数见表 1, 试验中所采用的焊接参数范围见表 2, 试验材料化学成分为  $x(\text{Fe}): 64.3\%$ ,  $x(\text{Cr}): 17.2\%$ ,  $x(\text{Ni}): 13.5\%$ ,  $x(\text{Mo}): 2.4\%$ ,  $x(\text{Mn}): 1.8\%$ ,  $x(\text{Si}): 0.8\%$ , 试样尺寸为 120mm × 50mm ×

Table 1 Parameter of Rofin Sinar 5kW CO<sub>2</sub> laser and Miller TIG welding machine

| parameter                 | value or pattern                  |
|---------------------------|-----------------------------------|
| laser mode                | TEM <sub>01</sub>                 |
| focus method              | reflect focusing                  |
| focal length              | 286.5mm                           |
| focus diameter            | 0.6mm                             |
| welding method            | direct current positive electrode |
| laser defocused distance  | 0mm                               |
| diameter of tungsten pole | 2.4mm                             |

Table 2 Parameters used in the experiment

| parameter               | value                   |
|-------------------------|-------------------------|
| laser power             | 0.5kW ~ 3.5kW           |
| arc current             | 30A ~ 180A              |
| space between power     | 1mm ~ 6mm               |
| welding speed           | 1000mm/min              |
| angle of power          | 60°                     |
| height of tungsten pole | 3mm                     |
| shield gas              | 15L/min (50% He 50% Ar) |

3mm, 自行研制的复合焊接装置见图 1。

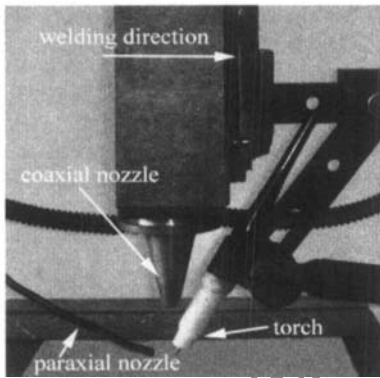


Fig 1 Schematic setup of CO<sub>2</sub> laser-TIG hybrid welding

## 2 实验结果与分析

### 2.1 不锈钢激光-TIG 焊缝成形特点

图 2a~ 图 2c 为小电流单独 TIG 电弧焊接条件下

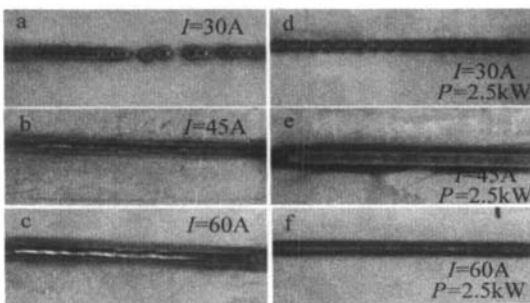


Fig 2 Surface morphology of arc and hybrid welds with little arc current. The welds show irregular shapes and spatter when arc current is low. When 2.5kW laser is added, the welds become smoother and more uniform.

道整齐、均匀,如图 2d~ 图 2f 所示。由此可得出:电弧在小电流条件下不稳定,2.5kW 激光的加入可以提高其稳定性,提高焊缝的表面成形质量。其原因是:激光加入后,其熔化、蒸发金属,为电弧提供良好的导电通道,使电弧燃烧的阻力减小,电场强度降低,增加了电弧的稳定性<sup>[6]</sup>。

如图 3 所示,单独电弧焊接因电弧能量不够集中,

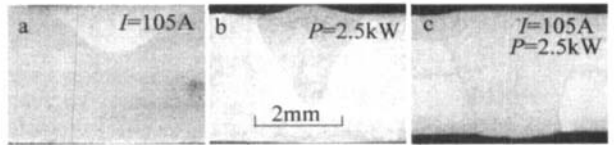


Fig 3 Cross sectional photos of laser arc and hybrid welds

熔宽较大,熔深较浅(1.05mm)深宽比较小;单独激光焊因能量集中,产生了小孔效应,熔深较大(2.09mm),深宽比较也较大;复合焊接则形成熔透充分,熔宽也大幅增加的焊缝。

由此可以得出:复合焊接可以提高焊缝的桥接能力、增大焊接熔深。其原因是:一方面电弧对材料表面起预热作用,提高了材料的表面温度,增大了材料对激光的吸收率;另一方面激光改变了电弧热源特性,激光与电弧复合时,电弧被吸引到激光与材料的冲击点上,电弧中心的温度急剧升高,可达 20kK,当电弧中心与周围环境的温差越大时,焊接时电弧收缩越强烈,因此电弧能量得到了集中,增大了焊接熔深<sup>[7]</sup>。

### 2.2 激光功率、电弧电流对焊缝成形的影响

如图 4 所示,在焊接电流为 60A 或 150A 时,焊接

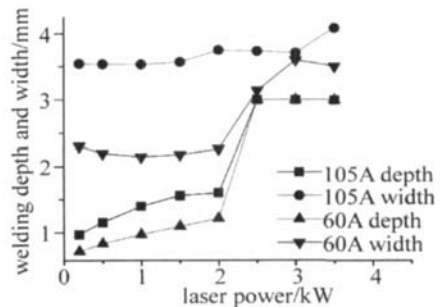


Fig 4 Effect of laser power on penetration depth & width

熔深都随激光功率的增加而增加,激光功率从 0kW ~ 2kW 时,熔深的增加比较缓慢,激光功率从 2kW ~ 2.5kW 时,熔深有一个飞跃。

从图 5 可进一步看出:在激光功率 P = 1.5kW 时,无论电弧电流如何变化,熔深都为 2.0mm 左右,而激光功率 P = 2.5kW、电弧电流变化时,焊缝都为充分熔透状态,电流越大,其熔透面积或熔宽越大。

以上现象的原因是:激光小孔效应是提高工件能量吸收率的决定性因素。激光小孔形成以后,工件将通过激光光束在小孔壁上的菲涅耳反射和等离子体反

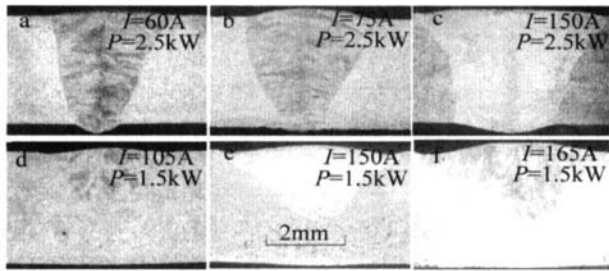


Fig 5 Cross sectional photos of different welding parameters

转致致辐射来大幅度提高激光能量吸收率,否则,激光能量只能通过热传导传输,工件对能量吸收率将急剧降低。在试验中,激光功率  $P < 2.5\text{kW}$  时,作用在工件上的能量有限,不能形成较强的光致等离子体和“小孔”,激光对电弧的引导和稳定作用有限,熔深仅随热输入的增加而缓慢增加,表现为热传导焊的特征;在激光功率  $P > 2.5\text{kW}$  时产生了小孔效应,电弧会因为小孔的吸引而不再飘移、跳跃,大量带电粒子从激光等离子体进入电弧,导致电弧电阻降低,电流增加,根据最小电压原理,电弧将受到压缩,从而电弧能量更为集中;其次位于工件表面的激光等离子体会因为带电粒子进入电弧而被稀释,有效抑制激光等离子体的膨胀,这将减少激光束在其中因为折射和散射而散失的能量,提高了工件对激光能量的吸收,提高了焊接熔深,焊接过程由热传导焊变成深熔焊<sup>[5]</sup>。

由此得出:激光小孔效应是引起电弧压缩的原因,是焊接熔深发生突变的决定因素。

从图 4 也可看出:105A 条件下熔宽线整体高于 60A 条件下熔宽线,其原因是 105A 条件下热输入较大,故熔宽较大。在 105A 条件下,随着激光功率的增加,熔宽变化不大,激光功率的增加主要导致熔深的增加。而在 60A 条件下,激光功率从  $0.5\text{kW} \sim 2\text{kW}$  时,熔宽变化缓慢,在  $2\text{kW} \sim 3\text{kW}$  时熔宽变化十分显著。这是因为:在小电流 60A 条件下,激光功率  $P > 2\text{kW}$  时,会出现小孔效应,激光对小电流(60A)电弧的引导作用强,能够强烈压缩电弧,工件对能量的吸收急剧增加,导致熔宽变化十分显著;而对 105A 的电弧来讲,因电弧电流较大,电弧弧柱尺寸较大,电弧弧柱发生阶跃式膨胀,电弧根部的压缩现象消失<sup>[8]</sup>,等离子体大小趋于稳定,激光对大电流电弧的引导作用有限,不能强烈压缩电弧,故熔宽随激光功率的变化不大,处于比较稳定的范围。

结合以上讨论得出:在小电流条件下,激光对电弧的压缩作用强,焊接熔宽与两热源的热输入关系密切;在大电流情况下,等离子体膨胀、长大,激光对电弧的引导作用变弱,仅电弧电流是焊接熔宽的决定性因素。

如图 6 所示,当激光功率  $P = 1.5\text{kW}$  时,随着电弧

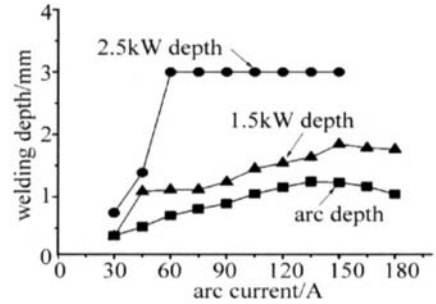


Fig 6 Effect of arc current on penetration depth

电流增加,熔深增加比较缓慢,最大的熔深仅为 1.8mm,而当激光功率  $P = 2.5\text{kW}$ ,电弧电流仅为 60A 时,其熔深已达 3mm。据此进一步佐证了以上结论:激光功率是否大于  $2.5\text{kW}$ ,是否产生小孔效应,是影响 TIG 焊熔深的重要因素。

图 6 中,在单独电弧条件下,随着电流的增加,熔深缓慢增加,当焊接电流超过 140A 后,熔深略微下降;在  $1.5\text{kW}$  条件下,当电弧电流大于 150A 后,熔深开始下降。其原因是当电流较大后,电弧能量增大,电弧弧柱气体的电离度提高,电弧体积膨胀,弧根变长,电弧散开,电弧能量不集中,同时激光对电弧的引导作用变弱,等离子体对激光吸收作用增强,激光能量被用于加热电弧<sup>[9-10]</sup>。导致焊接熔深缓慢下降,熔宽因等离子体的长大而增加。

图 7 中,在各自不同条件下,焊接熔宽都随电流的

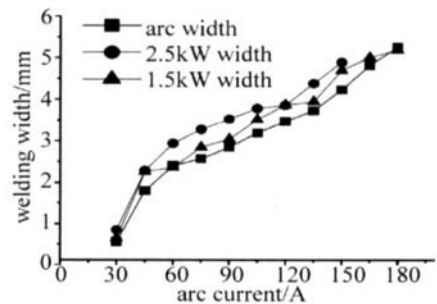


Fig 7 Effect of arc current on penetration depth

增加而增加,3条熔宽线比较集中,并没有因为激光功率的不同而发生剧烈变化,特别是大电流时,单独电弧、 $1.5\text{kW}$ 、 $2.5\text{kW}$  条件下焊接熔宽几乎没有差别。这也进一步佐证了以上结论:在大电流情况下,等离子体膨胀、长大,激光对电弧的引导作用变弱,仅电弧电流是焊接熔宽的决定性因素。

### 2.3 焊缝熔深随激光与电弧间距 $D$ 变化规律

在激光-TIG 焊接中,热源的复合效果对两者间距  $D$  十分敏感,存在一个最佳间距 ( $2\text{mm} \sim 3\text{mm}$ ),该条件下焊接熔深最深。

图 8 中,随着  $D$  的变化,焊接熔深存在一个最大值。当  $D$  为  $1\text{mm} \sim 2\text{mm}$  时,焊接熔深较小,这是因为激光直接作用在钨极附近,部分能量用于加热钨极,导

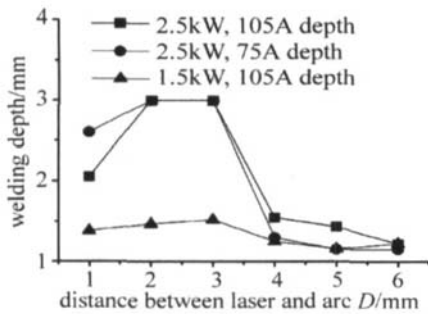


Fig. 8 Effect of  $D$  on bead width

致激光能量散失严重, 穿透能力下降, 熔深较小。

在  $D$  为 2 mm ~ 3mm 时得到最大熔深 (3mm), 是  $D$  为其它参数下的 1.46 倍 ~ 2.54 倍。当  $D > 3$ mm 后, 随着  $D$  的增加, 激光与电弧两者等离子逐步分离, 相互作用开始减弱; 另一方面, 保护气体由喷嘴至熔池的距离增加, 对熔池的保护作用和激光等离子体屏蔽的抑制能力也相对减弱, 降低了工件的激光吸收率。在  $D$  达到 6mm 时, 激光电弧等离子体完全分离, 焊接熔深与单独激光焊熔深相当。

### 3 结论

(1) TIG 电弧在小电流条件下不稳定, 激光的加入可以提高其稳定性, 提高焊缝的表面成形质量。复合焊接可以提高焊缝的桥接能力、增大焊接熔深。在激光功率  $P > 2.5$  kW 时, 会产生小孔效应, 激光压缩电弧, 其对复合焊接熔深影响显著。

(2) 激光-TIG 焊接中, 在电弧电流小于 150A 时, 激光对电弧的压缩作用强, 焊接熔宽与两热源的热输入关系密切; 当电流大于 150A 时, 激光对电弧的引导作用变弱, 等离子膨胀、长大, 仅电弧电流是焊接熔宽的决定性因素。

(3) 激光-TIG 焊接中, 热源的复合效果对两者间距  $D$  十分敏感, 存在一个最佳间距 (2mm ~ 3mm), 该条件下的焊接熔深是  $D$  为试验中其它参数下的 1.46 倍 ~ 2.54 倍。

### 参考文献

- [1] MODENESIP J, APOLNARIO E R, PEREIRA M. TIG welding with single-component fluxes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000(99): 260~265
  - [2] ZHU Y F, DONG Ch L. Laser arc hybrid welding technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002(9): 32~34 (in Chinese).
  - [3] PAN Y H. The welding of 316L stainless tube [J]. Gansu Science and Technology, 2006, 22(3): 46 (in Chinese).
  - [4] PAN Z X. The welding arts and crafts of 316L stainless [J]. Welding, 2002(12): 36 (in Chinese).
  - [5] STEEN W M. Arc augmented laser processing of materials [J]. JAP, 1980, 51(11): 5636~5641
  - [6] CHEN Y B, LEI Zh L, LI Q. Study of welding characteristics in CO<sub>2</sub> laser-TIG hybrid welding process [A]. International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics 2003 [C]. Orlando Laser Institute of America, 2003, 41~47
  - [7] LU L M, WANG J F, SONG G. Hybrid laser-arc welding of AZ31B Mg alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(2): 1523~1526 (in Chinese).
  - [8] PEHRING D, FUHRMANN C, WOLF N. Investigations and applications of laser-arc hybrid welding from thin sheets up to heavy section components [A]. International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics 2003 [C]. Orlando Laser Institute of America, 2003, A1~A10
  - [9] CHEN Y B, CHEN J, LI L Q *et al*. The arc shape & welding bead characteristic of the action of laser & arc [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2003, 24(2): 55~56 (in Chinese).
  - [10] XIAO R S, CHEN K, CHEN JM. Experimental research of the plasma shielding mechanism in the process of CO<sub>2</sub> laser welding [J]. Laser Technology, 2001, 25(3): 238~241 (in Chinese).
- 
- (上接第 488 页)
- [4] UCHIYAMA K, TAKARA H, KAWANISHI S *et al*. 100Gbit/s all optical demultiplexing using nonlinear optical loop mirror with gating width control [J]. Electron Lett, 1993, 29(21): 1870~1871
  - [5] OXENLOWE L K, SIAHLO A I, BERG K S *et al*. A photonic crystal fibre used as a 160 to 10Gbit/s demultiplexer [J/OL]. [http://www.crystal-fibre.com/publications/postleadline\\_papers.htm](http://www.crystal-fibre.com/publications/postleadline_papers.htm), 2006-09-16
  - [6] CLAUSEN A T, SIAHLO A I, SEOANE J *et al*. 320 to 10Gbit/s demultiplexing using a NOLM based on commercially available components [J]. Electron Lett, 2005, 41(5): 265~266
  - [7] SIAHLO A I, CLAUSEN A T, OXENLOWE L K *et al*. 640Gbit/s OTDM transmission and demultiplexing using a NOLM with commercially available highly nonlinear fiber [J]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005, 2: 883~885.
  - [8] XIE B, SUN X H, ZHANG M D. Studies on characteristics of NOLM demultiplexer [J]. Journal of Electron Devices, 2000, 23(1): 31~35 (in Chinese).
  - [9] CHEUNG C Y, SWIFT G, GHASSEMLOOY Z. Effect of Gordon-Haus jitter on nonlinear optical loop mirror (NOLM) demultiplexing [J]. Proc SPIE, 2001, 4216: 85~94
  - [10] CHEUNG C Y, GHASSEMLOOY Z, SWIFT G *et al*. Mathematical modelling and BER analysis of 100Gbit/s NOLM demultiplexer using a soliton shaped pulse for control and data [J]. Optoelectronics, 2000, 147(4): 245~250
  - [11] SHIH X, LIN J T. Performance analysis of the nonlinear optical loop mirror as the demultiplexer of OTDM system [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 1998, 21(4): 17~20 (in Chinese).