

文章编号: 1001-3806(2009)06-0593-04

304[#] 不锈钢旋转双焦点激光-TIG 焊接组织性能

温 阳, 汪 苏*, 李晓辉

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘要: 为了提高不锈钢焊接性能,提出了一种旋转双焦点激光-惰性气体钨极保护焊(tungsten inert gas, TIG)复合焊接方法,该方法通过旋转的两束激光与电弧进行旁轴复合。运用自行设计的旋转双焦点激光-TIG 复合焊接头对 304[#] 不锈钢进行了工艺试验,并分析了焊缝的组织 and 性能。结果表明,在旋转双焦点激光-TIG 复合焊接过程中,焊接电流和激光功率的有效耦合是影响焊缝组织的关键因素,而旋转频率的大小对焊缝的组织形成以及显微硬度都有非常重要的关系,低速旋转时可以引起焊缝的多次重熔,因此使得组织细小,硬度较高。该结果可用于指导激光-TIG 复合焊接技术的理论分析及其实验研究。

关键词: 激光技术;激光焊接;旋转双焦点激光-惰性气体钨极保护焊;不锈钢;组织

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.010

Microstructure and property of rotary double-focus laser-TIG hybrid welding of 304[#] stainless steel

WEN Yang, WANG Su, LI Xiao-hui

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the property of stainless steel welding, a rotary double-focus laser-tungsten inert gas (TIG) hybrid welding technique was proposed, in which the rotary double-laser beam and the TIG arc were applied in welding at the same time. The rotary double-focus laser-TIG hybrid welding torch was designed, and a detailed experiment of rotary double-focus laser-TIG hybrid welding on the 304[#] stainless steel plate with different welding parameters was carried out. The results showed that the hybrid function between the double-focus laser and arc was the main factors affecting the microstructure of welded joint, and that the rotation frequency affected the microstructure and micro-hardness of welded joint, the lower the rotary frequency, the higher the hardness because of smaller microstructure induced by re-melting of the welding line. The results are applicable in theoretical analysis and experimental research of laser-TIG hybrid welding technique.

Key words: laser technique; laser welding; rotary double-focus laser-tungsten inert gas; stainless steel; microstructure

引 言

激光焊接具有精密高效的特点,但是设备价格比较高,一般使用于比较精密零部件的焊接,对焊接条件要求比较高。而惰性气体钨极保护焊(tungsten inert gas, TIG)焊接的设备成本较低,并且对焊前的准备要求低,使得它在很大的范围内得到广泛应用^[1-2]。但是随着各种新产品对焊接要求的不断提高,使得焊接技术也不断发展。为了得到高效低成本焊接,人们将激光和电弧两个热源进行复合共同作用于被焊工件^[3]。作者在此基础上提出了一种新的焊接方法,通过将旋

转着的两束激光与 TIG 电弧进行精确的复合,然后共同作为焊接热源。利用这种方法对 304[#] 不锈钢进行焊接,分析了这种焊接方法产生的焊缝组织形态,并与单纯激光焊接时的组织进行了对比。

1 实验原理及方法

1.1 实验原理

旋转双焦点激光-电弧复合焊接过程中,两个焦点以一定的频率绕对称中心轴旋转,同时以焊接速度向前运动,这两者的运动复合起来形成了一个类似螺旋状轨迹前进,电弧与焊缝中心始终保持重合状态,并不进行旋转。图 1 为旋转双焦点激光-电弧复合焊接过程的示意图。

两个旋转着的激光束对熔池上方等离子体进行搅拌,打破了等离子体对激光束的负透镜效应,减少电弧对激光的能量吸收和散焦作用。近椭圆形的匙孔旋转

基金项目:国防“十一五”预研资助项目

作者简介:温 阳(1984-),男,硕士研究生,主要从事自动化焊接技术和激光焊接相关方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wangsu@buaa.edu.cn

收稿日期:2008-09-11;收到修改稿日期:2008-11-10

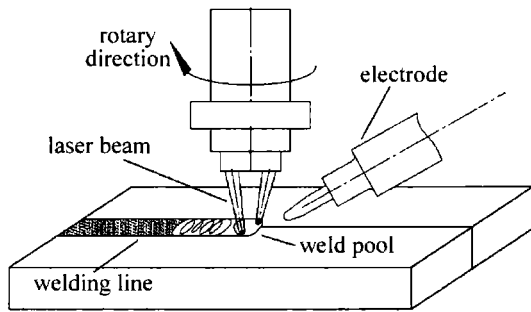


Fig. 1 Rotary double-focus laser-TIG hybrid welding

带动周围的液态金属一同旋转,由于液体自身的离心力作用以及在涡流状态下热交换作用的加强,使得在匙孔中焦平面附近的匙孔内腔变大,熔化的焊缝侧壁的金属也相应增加,与此同时焊缝中熔池表面的弯曲

Table 1 Element (mass fraction) and mechanics capability of 304# stainless steel

$w(C)$	$w(Si)$	$w(Mn)$	$w(P)$	$w(S)$	$w(Ni)$	$w(Cr)$	σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\delta/\%$	HV
0.0007	0.0046	0.0078	0.00032	0.00006	0.081	0.1832	300	670	60	169

用的材料为 304# 不锈钢,表 1 为其化学成分和力学性能。 σ_s 表屈服强度, σ_b 表抗拉强度, δ 表伸长率,HV 表硬度。焊接时采用的厚度为 4mm,试件规格为 150mm × 50mm × 4mm。

采用电弧电流、激光功率、焊接速度、激光旋转频率等离散变化的参量对试验板进行旋转双焦点激光-TIG 复合热源平板堆焊后,在获取较好焊缝成形的条件下从中选取合适的位置进行金相试样的制备,并用扫描电镜观察,研究旋转双焦点激光-TIG 复合热源焊接参量对焊缝组织性能的影响。

2 实验结果及分析

在熔焊中晶核长大过程比由夹杂物等引起的非均质形核过程更重要,因为液体熔池中析出的晶粒可以直接从母材基体上生长,也就是说从包围熔池的固态母材金属上形核长大。焊接时结晶过程完全由散失到固态金属中的热量决定,散失到周围空气中的热量很少。这一过程决定着形成晶粒的类型、尺寸和方位^[4-6]。

2.1 激光功率的影响

图 2 为在其它条件相同(速度 $v = 0.12m/min$,离焦量 $\Delta f = -1.5mm$,两热源间距 $a = 0.5mm$,旋转频率 $f = 11Hz$,焊接电流 $I = 90A$,保护气体为 Ar,气流量为

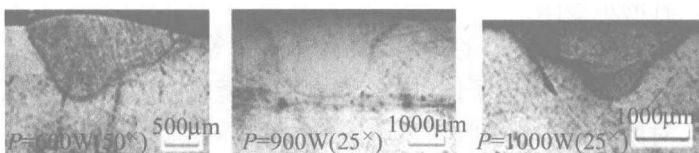


Fig. 2 Effect of laser power on weld shape

程度变大。因此,由激光产生的焊缝形状到熔池底部会变得比较宽,从而可以有效减小由于激光深熔焊引起的指状熔深。另外,旋转着的双焦点对焊接熔池起到搅拌作用,使得有害气体更容易逸出,减少焊接气孔的缺陷。

1.2 实验条件及方法

试验中所用激光器为额定功率 1.5kW 的快轴流 CO₂ 气体激光器和唐山松下公司的 TC-300WX4 交直流脉冲 TIG 焊机,旋转双焦点激光-TIG 复合焊接头为本实验室自行开发,激光焦距 200mm,聚焦后光斑直径 0.3mm,两焦点间距 0.36mm。复合方式为电弧在前,旋转双光束激光在后,保护气体采用高纯氩气。试验中双光束激光中心轴与 TIG 电弧的夹角为 60°,采

14L/min,文中若没有说明即指这些参量)时,不同激光功率所获得的焊缝宏观形状。图中可以看出,如果激光功率和电弧电流配合得较好,可以形成较好的酒杯形焊缝,如 $P = 900W$ 时的焊缝形状,其指状熔深非常小,焊缝形状非常典型。

图 3 所示为相同状况下所获得的焊缝组织,从图

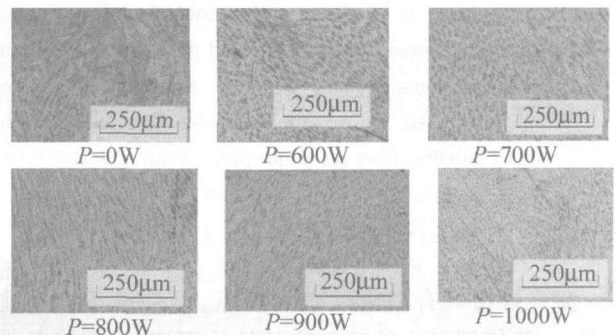


Fig. 3 Effect of laser power on microstructure

中可以明显看出旋转双焦点激光-TIG 复合焊接产生的组织比单纯的 TIG 焊($P = 0W$)焊缝组织要细,而且随着激光功率的增加,焊缝的组织也不断细化。这是因为激光功率小时焊缝熔深较小,胞状树状晶长大并一直到结晶完了,因此相对来说晶粒较大;但是在熔深较大的焊缝中,在树枝晶成长过程中,溶质中元素向焊缝中心区聚焦,最后在中心区形成微细等轴晶^[5-7]。

2.2 焊接电流的影响

焊接电流的改变,对焊缝成形有较大影响,图 4 为

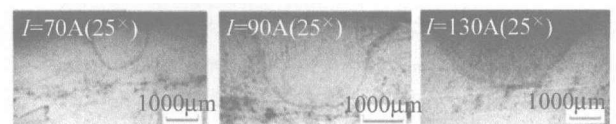


Fig. 4 Effect of current on weld shape

激光功率在 900W 情况下,不同焊接电流形成的焊缝宏观形状。

图 5 所示是在不同焊接电流下产生的焊缝组织,

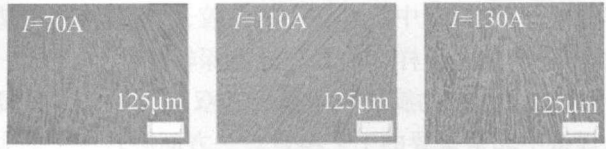


Fig. 5 Effect of current on microstructure

随着焊接电流的增大,焊缝组织也变得粗大。由于焊缝冷却时,先共析铁素体优先沿奥氏体晶界析出,随着电流的不断增大,晶内焊接热输入变大,转变温度较高,奥氏体晶粒急剧长大,使得原本应生成正常的针状铁素体组织,转变为粗大的针状铁素体组织。

2.3 焊接速度的影响

图 6 为不同焊接速度下的焊缝成形,从图中可以

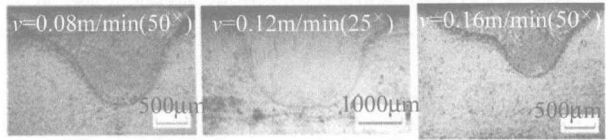


Fig. 6 Effect of welding speed on weld shape

看出,无论是熔深还是熔宽,都随着焊接速度的改变出现较大的变化。随着焊接速度的增加,焊缝熔深、熔宽都随着焊接速度的增大逐渐减小。这是因为随着焊接速度的增大,热源线能量减小,焊缝单位长度上的热输入量减小,从而使金属的熔敷量减小。

焊接速度是影响热输入量的重要因素,减小焊接热输入,利用激光焊接加热速度快的特点来减小奥氏体晶粒尺寸,控制奥氏体晶粒长大,降低转变温度,这样有利于生成细小密集的针状铁素体,改善焊缝的冲击韧度和塑性。当焊接速度变化时,焊缝组织的形态随焊接热循环条件变化,冷却速度缓慢时岛状物显著长大。随着焊接速度的增加,热输入量变小,冷却速度加快,形成的粒状贝氏体的颗粒细小,如图 7 所示。快

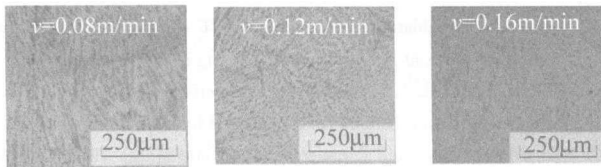


Fig. 7 Effect of welding speed on microstructure

速冷却形成的粒状贝氏体组织比焊缝中常见的马氏体组织硬度较软。采用较大的焊接速度,加快焊缝冷却,使焊缝中形成细小的晶粒,帮助提高焊缝塑性和韧性^[6-8]。

2.4 旋转频率的影响

双焦点激光的旋转频率是旋转双焦点激光焊接中一个非常重要的焊接参量。旋转频率的改变会影响焊接过程的稳定性和焊缝形状,如图 8 所示。

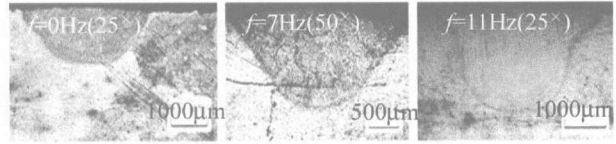


Fig. 8 Effect of frequency on weld shape

另外,双焦点激光的旋转频率对焊缝组织的形成也具有一定的影响。图 9 为不同旋转频率下获得焊

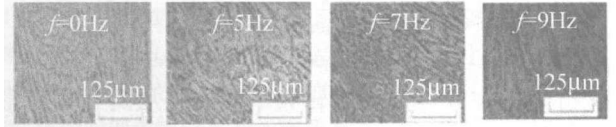


Fig. 9 Effect of frequency on microstructure

缝。由于在不旋转($f=0\text{Hz}$)情况下,焊缝受热比较稳定,冷却过程比较平稳,因此,可以生成比较长的晶体。当激光进行低速旋转时,处于焊缝后端冷却的熔池边缘温度多次降低再升高,这部分的组织受到多次重熔,并有可能出现再结晶,使得这部分的晶体晶粒度变小。但是随着旋转频率的加快,温度还没有来的及冷却就又被加热,使得这部分金属长时间处于高温状态,有充分的时间进行晶粒的长大。随着针状铁素体粗大、数量减少,形成粗大的柱状魏氏组织,这在一定程度上降低组织的材料性能,尤其是对冲击韧度下降影响较大。

2.5 显微硬度分析

旋转双焦点激光-TIG 复合焊接中,旋转双焦点激光的加入对焊缝中各个部分的显微硬度影响较大,图 10 为焊缝中各部分显微硬度随激光功率大小的变化情况。从图中可以看出,当激光功率为 0 时,也就是单

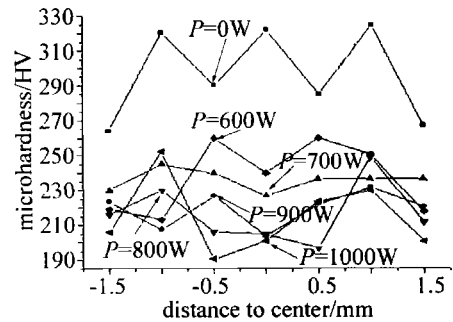


Fig. 10 Effect of laser power on micro-hardness

纯的 TIG 焊接时,各个部分的显微硬度明显要高得多,在 260HV ~ 330HV 之间波动。随着旋转双焦点激光的加入,一方面两个热源的输出热增加,另一方面激光和电弧之间耦合作用大大提高了热源的利用率,使得更多的热量被工件吸引,单位体积内吸收的热量显著增加,焊缝的平均显微硬度显著下降,基本在 190HV ~ 250HV 之间波动。从图中还可以看出,在每一条焊缝中各部分的显微硬度基本都是关于焊缝中心对称的,焊缝中心由于热量较高,因此冷却速度相对较慢,故硬度值相比之下要低一些。

图 11 为焊缝显微硬度随双焦点激光的旋转频率

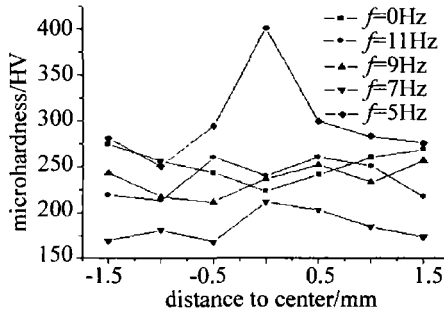


Fig. 11 Effect of frequency on micro-hardness

变化折线图。双焦点的旋转频率主要是从两个方面影响焊缝的硬度,一方面是旋转的双焦点可以改变焊缝各个部分的热量分布,由于双焦点的旋转,可以加快熔池的搅拌,因此,熔池各个部分的能量分布更容易区域均匀,这样各个部分的硬度也趋于均匀。从图 11 中可以看出,在旋转频率为 0 时,也就是不旋转的情况下,由于焊缝中心位于两束激光产生的匙孔的中间,故温度较高,能量较高,这样使得该部分的冷却速度较小,从而中心部分的硬度值明显低于两侧。而通过双焦点的旋转,加速熔池中各部分能量的传递,故各个部分的能量比较均匀。但是另一个方面在旋转频率较低时,由于焊缝中的金属几次受到高温金属溶液的作用,引起了焊缝中心组织的再结晶,因此硬度比周围要高,如图中 $f=5\text{Hz}$ 的状态。随着旋转频率的不断增加,焊缝各部分的硬度也就不断趋于平均。

3 结论

(1) 激光功率和焊接电流对旋转双焦点激光-TIG 复合焊接焊缝组织产生重要影响,这是因为这两者不但影响热源提供能量的大小,更重要的是两者之间耦

合作用的强弱直接影响焊接热源的利用率。

(2) 焊接速度的大小可以改变焊缝冷却速度,影响焊缝组织晶粒度。采用较大的焊接速度,可以加快焊缝冷却,使焊缝中形成细小的晶粒,帮助提高焊缝塑性和韧性,但是这样产生的焊缝熔深较浅。

(3) 双焦点的旋转频率是旋转双焦点激光-TIG 复合焊接中非常重要的工艺参量。一方面旋转频率的大小可以影响晶粒度的大小,另一方面对焊缝的显微硬度影响也较大,在低速旋转时还会引起焊缝的再结晶。

参考文献

- [1] BAGGER C, OLSEN F O. Review of laser hybrid welding [J]. *Journal of Laser Application*, 2005, 17(1): 2-14.
- [2] TUSEK J, SUBAN M. Hybrid welding with arc and laser beam [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 1999, 4(5): 308-311.
- [3] HU Sh S, ZHANG Sh B, ZHAO J R. Arc augmented laser welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1993, 14(3): 159-163 (in Chinese).
- [4] HARTFORD E. *Stainless steel welding* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 56-68 (in Chinese).
- [5] ZHAO L, CHEN W Zh, ZHANG X D. Microstructure and mechanical properties of laser welded joint of NULCB steel [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(4): 344-346 (in Chinese).
- [6] ZHANG X D, CHEN W Zh. Microstructures and toughness of weld metal of ultrafine grained ferritic steel by laser welding [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2004, 20(6): 755-759 (in Chinese).
- [7] ZHAO L, ZHANG X D, CHEN W Zh. CGHAZ microstructure and properties of RPC steel laser welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(6): 131-135 (in Chinese).
- [8] YIN C Q, ZA X Zh, LU B Zh. Granular bainite in microstructures after welding and its effects on impact toughness in STE355 steel [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, 24(2): 55-58 (in Chinese).

(上接第 592 页)

- [6] Phipps C R, Harrison R F. Enhanced vacuum laser-impulse coupling by volume absorption at infrared wavelengths [J]. *Laser and Particle Beams*, 1990, 8(1/2): 281-298.
- [7] WANG G B, LUO F, LIU C L, *et al.* The research of the ablation morphology of the composite reinforced by polyaryl amide fibers irradiated by laser [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 168-169 (in Chinese).
- [8] CHEN B, WAN H, MU J Y, *et al.* Ablative mechanism of carbon-fiber/epoxy composite irradiation by repetition frequency laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(4): 547-552 (in Chinese).
- [9] GUO Y L, LIANG G Zh, QIU Zh M, *et al.* Effect of laser parameters on mass ablative rate of carbon fiber reinforced composite [J]. *Acta Materialia Composita Sinica*, 2006, 23(5): 84-88 (in Chinese).
- [10] YIN J, ZHANG H B, XIONG X, *et al.* Influence of microstructure of pyrocarbon on ablation performances of C/C composites [J]. *Chinese Journal of Material Research*, 2007, 21(1): 10-14 (in Chinese).
- [11] WANG G B, LIU C L. Absorption characteristics of the composite reinforced by polyaryl amide fiber irradiated by high power laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(11): 1065-1067 (in Chinese).
- [12] ZHANG Y Q, WANG W P, TANG X S, *et al.* Coupling rules of two fiber reinforced composites with continuous wave laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(10): 1599-1602 (in Chinese).