

低功率激光-TIG 电弧复合焊接不锈钢熔深研究

Study on Penetration of Low Power Laser-TIG Arc Hybrid Welded Stainless Steel

西北工业大学 樊艳峰 刘金合 罗晓娜 徐韦锋

[摘要] 建立了一套低功率 YAG 脉冲激光-TIG 电弧复合热源焊接系统,并用本系统对不锈钢 1Cr18Ni9Ti 进行焊接,研究了 3 种热源作用下不锈钢的焊缝熔深。通过引入焊缝有效热输入概念,对复合热源影响熔深的机理进行了分析。

关键词: 低功率激光-TIG 电弧复合热源 不锈钢 热输入 熔深

[ABSTRACT] A low power YAG pulse laser-TIG arc hybrid thermal source welding system is established, in which stainless steel 1Cr18Ni9Ti is welded and weld penetration of stainless steel under 3 kinds of thermal sources is studied. The effect mechanism of hybrid thermal sources on welding penetration is analyzed by introducing the concept of effective thermal input of welding.

Keywords: Lower power laser-TIG arc hybrid thermal source Stainless steel Thermal input Penetration

激光-电弧复合焊接技术是由伦敦帝国大学的 W.Steen 于 20 世纪 70 年代末首先提出的^[1]。这种技术具有焊接效率高、焊缝成形好、焊缝搭桥能力强和能源利用率高的优点^[2]。但是由于当时条件的限制,这种技术并没有立刻引起广泛关注。近年来,随着工业生产对焊接效率和焊接质量的要求越来越高,各国研究者再次将注意力集中到激光电弧复合焊接技术上^[3-5]。

目前对激光-电弧复合焊接技术的研究主要集中在大功率激光器与电弧的复合上。但是大功率激光器存在以下问题:光电转换效率低,激光器功率越大,能量消耗就越大,导致能源消耗增加;体积大,成本和维护费用高,导致焊接成本提高。这些因素对该技术的实际应用非常不利^[6],因此对成本低、能源消耗低的低功率激光-电弧复合焊接技术展开研究就显得尤为重要。

本课题建立了一套低功率 YAG 脉冲激光-TIG 电弧复合焊接热源系统。以不锈钢 1Cr18Ni9Ti 为试验材料,研究了焊接复合热源对不锈钢焊缝熔深的影

响。通过计算分析了 3 种热源作用下焊缝的有效热输入,对复合热源影响熔深的机理进行了分析,为低功率 YAG 脉冲激光-TIG 电弧复合焊接技术的推广应用及其机理研究打下了一定的基础。

1 试验原理与方法

1.1 焊接复合热源系统

本试验建立焊接复合热源系统的出发点是让尽可能多的激光作用到工件上,以提高激光能量的利用率。

哈尔滨工业大学陈彦宾等人^[7]的研究表明,低功率的激光脉冲穿过大电流的电弧时,电弧对激光能量的吸收随着电流的增大呈线性增加,但是当电流增大到一定程度时,电弧对激光能量的吸收保持基本稳定。低功率激光穿过电弧的不同区域,其能量损耗不同:电弧近阳极区的损耗较大,而在近阴极区的损耗相对较小,当激光贴近阴极区域穿过时,能量几乎没有损耗,如图 1 所示。在试验中,为了减少电弧对激光的吸收,提高激光的利用率,TIG 电弧采用了直流反接模式,以使低功率激光尽可能从靠近电弧的阴极区中穿过。

复合热源采用旁轴复合形式,直流反接的 TIG 电弧在前,低功率 YAG 脉冲激光在后。组建的焊接复合热源系统的示意图见图 2。该系统所用到的设备包括钨极氩弧焊机、光纤传输激光焊设备和焊接机器

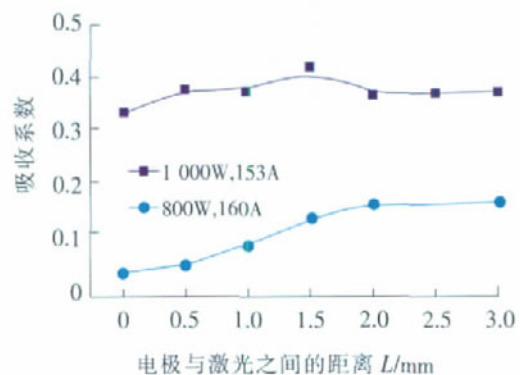


图 1 电弧不同区域对激光的吸收

Fig.1 Laser absorption of different areas in arc

人。试验中,分别将氩弧焊焊枪和激光焊枪装夹在机器人手臂上,Nb:YAG 固体激光器发射的激光由光纤传输给激光焊枪。

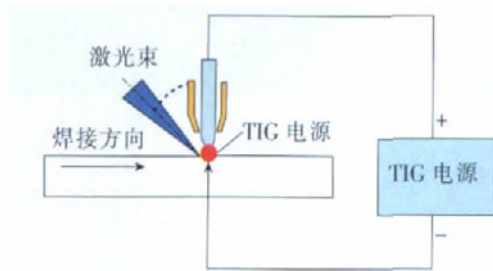


图2 复合热源系统示意图

Fig.2 Schematic of hybrid thermal source system

1.2 熔化焊缝金属有效热输入分析计算

整个焊接过程中的热源总能量 Q 的分布可由式

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1)$$

给出^[8]。式中, Q_1 表示在周围环境损失的能量, Q_2 表示用于熔化焊缝金属的能量(包括熔化潜热), Q_3 表示由于母材金属散热而引起的热损失。这 3 部分能量中对焊缝熔深有直接影响的是 Q_2 , 称之为有效能量。

为了对不同热源的焊缝有效热进行比较, 采用将其转化为不同热源作用后焊缝横截面积的比较。单位时间内复合热源的有效热作用 Q_e 可由式

$$Q_e = A v \rho \left(\int_{T_0}^{T_m} c dT + H \right) \quad (2)$$

得到。式中, A 为焊缝横截面积, v 为焊接速度, ρ 为焊接材料密度, T_m 为熔点, T_0 为环境温度, H 为熔化潜热, c 为比热容。

TIG 电弧、激光和复合热源作用下的焊缝有效热输入可分别表示为

$$Q_{ei} = A_i v \rho \left(\int_{T_0}^{T_m} c dT + H \right); \quad (3)$$

$$Q_{ek} = A_k v \rho \left(\int_{T_0}^{T_m} c dT + H \right); \quad (4)$$

$$Q_{e} = A_e v \rho \left(\int_{T_0}^{T_m} c dT + H \right)。 \quad (5)$$

由于焊接过程中焊接材料、焊接速度的值是一定的, 因此式(3)(4)(5)中的 $v \rho \left(\int_{T_0}^{T_m} c dT + H \right)$ 为常数。在不同热源作用下的焊缝有效热输入比值 δ 为

$$\delta = \frac{Q_{ei}}{Q_{ek}} = \frac{A_i}{A_k} \quad (6)$$

式中的 Q_{ei} 、 Q_{ek} 分别表示不同热源焊缝有效热输入, A_i 、 A_k 则表示在相应热源作用下的焊缝横截面积。从式(6)可以看出比值 δ 与热源种类无关, 而仅与不同热源作用下的焊缝横截面积有关。

1.3 试验方法

试验材料选用不锈钢 1Cr18Ni9Ti, 试件尺寸为 225mm×25mm×8mm。焊前用砂纸打磨试件表面, 以去掉表层氧化皮。然后用丙酮擦拭试件表面, 以去掉试件表面的油污。

试验分为 3 组进行。第一组在仅有反接的 TIG 电弧的作用下进行焊接, 焊接的工艺规范如表 1 所示。第二组在仅有低功率 YAG 脉冲激光的作用下进行焊接, 焊接的工艺规范如表 2 所示。第三组利用组建的复合热源系统进行焊接。在复合热源中, 激光与电弧作用点之间的距离为 3.8mm, 其他焊接工艺规范和前两组试验相同。焊接完成后切割取样, 制作全相照片。

表 1 TIG 焊焊接工艺规范

电源接法	电流 I/A	焊速 v/(mm/min)	弧长 L/mm	气流量 Ar /(L/min)
直流反接	190	120	5	15

表 2 激光焊焊接工艺规范

脉冲频率 f/Hz	脉宽 t/ms	离焦量 z/mm	平均功率 P/kW	焊速 v/(mm/min)
10	5	0	0.3	120

2 试验结果及分析

2.1 不同热源作用下焊缝横截面熔池的宏观形貌

3 组试验得到的焊缝熔池截面宏观形貌如图 3 所示, 为便于计算, 在照相时, 加上了刻度尺。从图中可以看出, TIG 电弧单独作用时, 焊缝熔池浅而宽, 熔池底部比较平坦; 激光单独作用时, 焊接模式为热传导模式, 熔池呈半球状, 熔深很小, 仅为 0.63mm; 当 TIG 电弧与低功率 YAG 脉冲激光复合后, 焊缝熔深明显增加, 熔池下半部呈半球状, 接近熔池顶部的地方有明显的喇叭口收边。

2.2 3种热源作用下的焊缝熔深

3 种热源作用下的焊缝熔深如图 4 所示。从图中可以看出, 复合热源能明显增加熔深。其熔深分别为

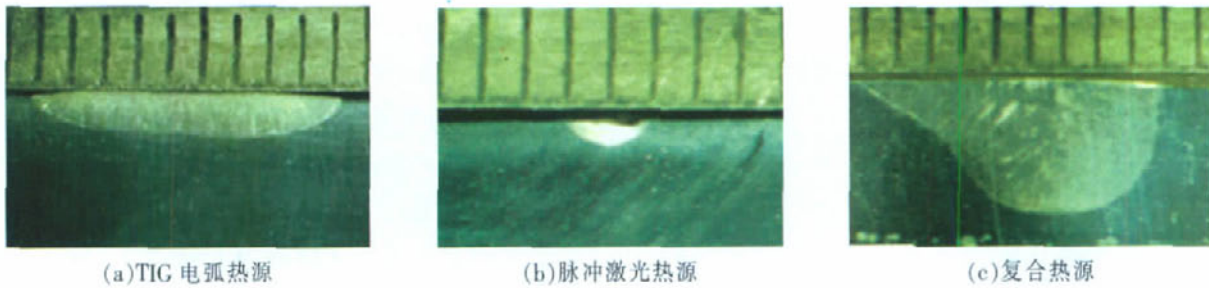


图3 用3种热源得到的焊缝熔池宏观形貌

Fig.3 Macrostructures of molten bath of weld seam got from 3 kinds of thermal sources

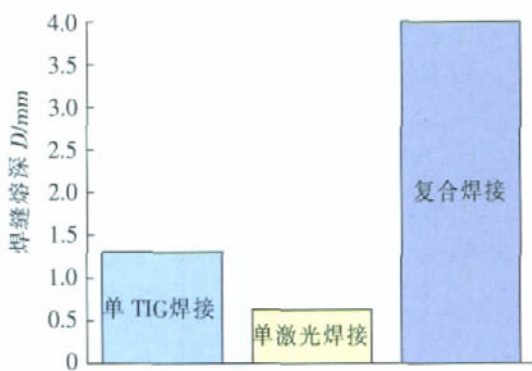


图4 3种热源作用下的熔深

Fig.4 Penetration under 3 kinds of thermal sources

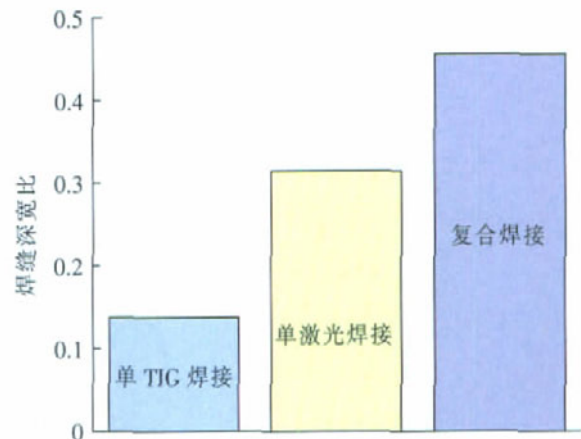


图6 3种热源作用下的深宽比

Fig.6 Depth-to-width ratio under 3 kinds of thermal sources

TIG 焊熔深和激光焊熔深的 3.08 倍和 6.35 倍, 为两者熔深之和的 2.07 倍。低功率激光与 TIG 电弧复合不是两热源的简单叠加, 二者复合后表现出了 $1+1>2$ 的效果。

2.3 3种热源作用下的焊缝熔宽及深宽比

3种热源对焊缝熔宽及深宽比的影响如图5、6所示。从图5中可以看出,与TIG热源单独作用时相比,复合热源作用下的焊缝熔宽稍有降低。低功率脉

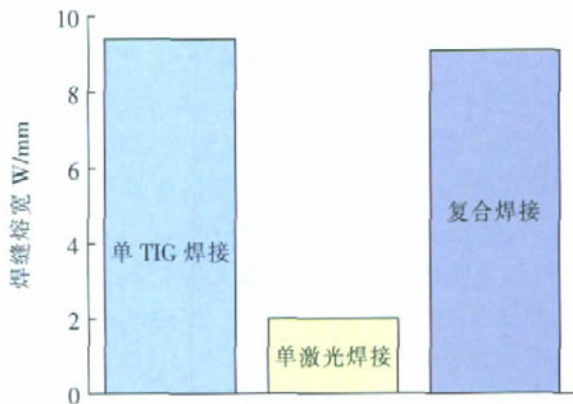


图5 3种热源作用下的熔宽

Fig.5 Melting width under 3 kinds of thermal sources

冲激光并没有使TIG电弧产生明显收缩,进而引起焊缝熔宽的减小。从图6中可以看出复合热源作用下的焊缝深宽比有明显增加,分别为TIG电弧和低功率激光单独作用时的深宽比的3.3倍和1.45倍。

2.4 3种热源之间焊缝有效热输入比较

对焊缝横截面宏观形貌进行二值化处理,求得焊缝横截面积。为比较不同热源下的焊缝有效热输入,将所求的焊缝横截面积代入式(6)进行计算。计算结果如表3所示。从表中可以看出,无论是与TIG电弧、低功率激光的有效热输入单独比较还是与它们的和相比较,复合热源的有效热输入都有了非常显著的增加。

2.5 分析与讨论

TIG电弧与激光复合后,二者存在着相互作用。通常认为其作用机制有2种:激光-电弧等离子体相互作用机制和电弧预热机制,这2种机制都能使焊缝熔深增加。高明等人通过定义复合焊接熔化效率来研究激光-电弧复合焊接中2个热源间的相互作用,他们

的研究结果表明电弧的预热作用能够提高激光能量的利用率,增强热源相互作用,激光-电弧等离子体相互作用则是提高热源相互作用程度的关键机制⁹⁾。

激光等离子体与电弧等离子体的相互作用同2种热源的相关参数有关:第一,激光能量要大,以便产生足够多的等离子体;第二,激光与电弧之间的距离要小(最好小于3mm),具备这2个条件就可以使2种等离子体产生更强的耦合作用。在本试验中,激光平均功率仅为300W,能量比较低,其焊接模式为热传导模式,激光产生的等离子体很稀薄;另外,2个热源之间的距离为3.8mm,相对来说比较大,上述的2个因素使得两种热源产生的等离子体间的相互作用被抑制,因此激光-电弧等离子体相互作用机制对增加焊缝熔深的贡献比较小。

我们利用表3的数据计算出复合热源作用下焊缝有效热输入是TIG电弧和低功率激光作用下的有效热输入之和的2.19倍,可见复合后用于熔化焊缝金属的有效能量大大提高了。在激光焊中,激光能量利用率会随着工件温度的升高而增大。在复合热源中,在前的热源TIG电弧预先对激光作用点前方的工件进行加热,使工件表面温度升高甚至达到熔点,从而提高了激光的吸收率而降低了其在工件表面的反射率;同时,激光直接作用在高温金属上,减少了熔化焊缝金属所需的能量,因此,在相同的激光能量下,能够使更多的焊缝金属熔化,焊缝熔深就会增加。因此,在本试验条件下,焊缝熔深的增加很可能是由于TIG电弧对工件进行了预热,从而提高激光能量的利用率,增加了焊缝的有效热输入引起的。在这种机制下,焊缝的熔宽没有变化,或者变化很少,见图5。

表3 焊缝有效热输入之比和横截面积比值

有效热输入之比	Q_{ch}/Q_{et}	Q_{ch}/Q_{el}	$Q_{ch}/(Q_{et}+Q_{el})$
横截面积比值	2.377 2	28.222 5	2.192 5

3 结论

(1)建立了低功率脉冲YAG激光-TIG电弧焊接复合热源系统,试验证明本系统能够显著增加焊缝熔深。

(2)低功率YAG脉冲激光与TIG电弧复合热源表现出了1+1>2的效果。不锈钢1Cr18Ni9Ti在复合热源作用下的焊缝熔深是2热源分别单独作用时的

熔深之和的2.07倍,同时前者熔池的深宽比也要明显优于后两者。

(3)在本文叙述的试验条件下,复合热源增加焊缝熔深的机理初步认为是TIG电弧通过对工件的预热,提高了激光能量的利用率,从而增加了焊缝有效热输入。

参 考 文 献

- [1] Claus Bagger, Flemming O Olsen. Review of laser hybrid welding. *Journal of Laser Application*, 2005, 17(1): 2-14.
- [2] 朱轶峰,董春林. 激光电弧复合焊接技术. *航空制造技术*, 2002(11): 32-34.
- [3] 韩立军. 激光焊接技术在汽车制造中的应用与发展. *机械工人(热加工)*, 2007(6): 42-47.
- [4] 滕文华. 激光-电弧复合焊接在汽车制造中的应用. *电焊机*, 2004, 34(6): 9-11.
- [5] Staufer, Herbert. Laser-hybrid welding of ships. *Welding Journal*, 2004, 12(6): 32-33.
- [6] 康乐,黄瑞生,刘黎明,等. 低功率YAG激光-MAG电弧复合焊接不锈钢. *焊接学报*, 2007, 28(11): 69-72.
- [7] 陈彦宾,李俐群,吴林. 电弧对激光吸收与散焦的定量测量. *焊接学报*, 2003, 24(3): 56-58.
- [8] 王后孝. 熔焊过程的热效率. *焊接*, 2007(10): 15-19.
- [9] 高明,曾晓雁,严军,等. 激光-电弧复合焊接的热源相互作用. *激光技术*, 2007, 31(5): 465-468. (责编 淡蓝)

(上接第83页)

结果与实测试验结果能较好吻合。如果不考虑温度转折点的热历程时间差异,模拟试验结果与实测试验结果差异在10℃以内。

热压罐工艺的框架式模具温度场分布特点:在升温阶段框架式模具高温区主要分布在罐门进风端(次者在罐尾出风端),低温区主要分布在框架式模具中间位置,而且框架式模具温差比较大;在保温阶段模具温差相对比较小;在降温阶段温度分布大体呈现与升温阶段相反的趋势,温差也比较大。

参 考 文 献

- [1] 刘善国. 国外飞机先进制造技术发展趋势. 2002年航空制造技术学术交流会议论文集. 北京:航空制造技术杂志社, 2002.
- [2] Andrew Johnston. An investigation of autoclave convective heat transfer. Quebec: Concordia University Montreal, 2004.
- [3] 严家騄. 工程热力学(第三版). 北京:高等教育出版社, 2002: 75-79. (责编 淡蓝)