

活性剂对不锈钢 YAG 激光 - 电弧复合焊接的影响*

Effect of Activating Flux on YAG Laser-TIG Arc Hybrid Welded Stainless Steel

西北工业大学材料学院 潘晓冬 刘金合 包海涛 徐韦锋
中国人民解放军驻 430 厂军事代表室 朱石刚

[摘要] 以 8mm 厚的热轧态不锈钢 1Cr18Ni9Ti 为试验对象,分析了激光和电弧 2 种热源共同作用下单质活性剂(SiO_2 、 TiO_2 、 CaF_2)对 YAG 激光-TIG 电弧复合焊接的影响。结果表明:这 3 种活性剂都能不同程度地增加焊缝熔深,其中 SiO_2 、 TiO_2 可使熔深显著增加;结合电弧形态、测温曲线峰值温度综合分析发现,活性剂的加入使电弧收缩是增加焊缝熔深的主要原因,其次是活性剂对激光等离子体存在抑制作用,两者表现出激光-TIG 电弧复合活性剂焊接的焊缝中心测温曲线的峰值温度与焊缝熔深以及深宽比同时增加。

关键词: 活性剂 激光-TIG 复合焊接 熔深 电弧形态 测温曲线

[ABSTRACT] Under the combined action of the laser and arc, the effects of activating fluxes(SiO_2 、 TiO_2 、 CaF_2) on YAG Laser-TIG Arc hybrid welded 1Cr18Ni9Ti stainless steel are studied. The results show that all three activating fluxes can deepen the welding penetration, and SiO_2 and TiO_2 can remarkably increase penetration. By comparison and analysis of arc shape, peak temperature of temperature testing curve. The arc shrinks are found in relation to using of activating fluxes, meanwhile. Activating flux can also effectively restrain laser plasma. Actually, The two factors increase peak temperature of temperature curves in weld center. And the weld penetration depth and aspect ratio increase at the same time.

Keywords: Activating flux Laser-TIG hybrid welding Penetration Arc shape Temperature testing curve

激光-电弧复合焊最早是由英国的 W.steen 于 20 世纪 70 年代末提出来的^[1]。激光-电弧复合焊接具有焊接熔深大、速度快、变形小、熔池搭桥能力强、能够焊接高反射率材料等特点^[2]。近年来,激光-电弧复合焊接已经得到了发达国家焊接领域的广泛关注。目前,各国

焊接工作者对复合焊接的研究重点为激光电弧相互作用机理的研究和焊接工艺与设备的开发。在活性剂焊接方面,自 20 世纪 60 年代中期巴顿焊接研究所提出了“活性化 TIG 焊”的概念以来,国内外科研机构和产业部门对活性化 TIG 焊方法开展了深入研究,并已形成 A-TIG 焊的概念和技术^[3-4]。同时,受 A-TiG 启发,研究者将活性焊接方法引入激光焊接,就活性剂对焊缝成形的影响以及活性剂增加焊缝熔深的机理进行了大量研究^[5-6]。

但是,目前涉及激光电弧复合焊接时活性剂的作用效果和影响规律则少有报道。本文以 1Cr18Ni9Ti 为试验材料,选取 SiO_2 、 TiO_2 、 CaF_2 作为活性剂,结合实时监测到的温度场分布曲线和电弧形态,比较分析焊缝宏观形貌和熔深、熔宽数据,研究它们对激光-TiG 复合焊接不锈钢的影响,为激光-TIG 电弧复合的活性剂焊接技术的推广应用及其机理研究打下了一定的基础。

1 试验材料和方法

试验选用尺寸规格 25mm×225mm×8mm 的 1Cr18Ni9Ti 钢板作为焊接试验材料,材料化学成分见表 1。

表 1 1Cr18Ni9Ti 化学成分表 %

C	Si	P	S	Mn	Cr	Ni
≤ 0.12	≤ 0.80	≤ 0.035	≤ 0.03	1.0 ~ 2.0	17.0 ~ 19.0	8.0 ~ 9.5

试验采用的是低功率 YAG 激光-TIG 电弧复合焊接设备,由 FRONIUS 钨极氩弧焊机、光纤传输激光焊设备和焊接机器人 3 部分组成。复合热源采用旁轴复合形式,直流反接的 TIG 电弧在前,YAG 脉冲激光在后(如图 1 所示)。

焊接采用平板堆焊,氩气作为保护气体。试验中,将氩弧焊焊枪和激光焊枪装夹在机器人手臂上,所有的焊接都通过机械手臂自动完成。焊接参数如表 2 所示。

试件首先采用砂纸打磨,使用丙酮擦洗表面以去除油污等有机物,再固定在工件台上。然后将研磨过的活性剂和丙酮溶剂混合均匀,用毛刷将活性剂溶液均匀

* 国家自然科学基金(50675179)资助项目。

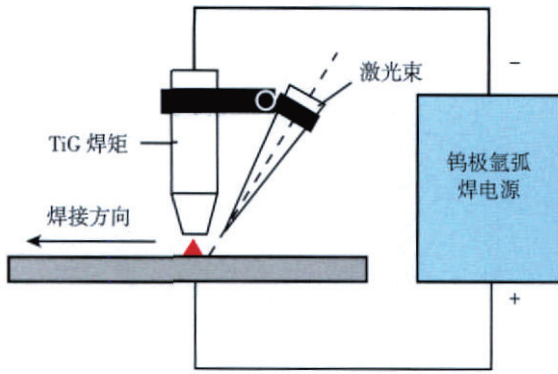


图1 激光-TIG复合热源示意图
Fig.1 Principle of Laser-TIG hybrid welding

表2 激光-TIG焊接工艺参数

TIG焊规范参数		激光焊规范参数	
电源接法	直流反接	脉宽 t/ms	5.4
焊接电流 I/A	190	脉冲频率 F/Hz	10
焊速 $V_w/(mm \cdot min^{-1})$	120	激光能量 J	30
钨针距工件距离 L/mm	4	激光与电弧间距 D_{LA}/mm	3
Ar气流量 $q_v/(L \cdot min^{-1})$	10	Ar气流量 $q_v/(L \cdot min^{-1})$	8

地涂敷在试件的整个表面上,其厚度直到看不到母材表面光泽为宜,等到丙酮完全挥发后,进行焊接试验。焊接过程中采用 Panasonic 专业数码相机拍摄无活性剂和活性剂时的电弧形态,以便对比分析使用不同活性剂时电弧形态是否发生变化。拍摄时,取垂直于电弧前进方向角度进行拍摄,并在镜头前加滤色片以保护镜头;同时,通过热电偶、温度变送器端子板、研华数据采集卡和计算机检测系统组成的测温系统对涂敷不同单质活性剂的焊接过程进行温度采集以得到焊接过程中的焊缝中心温度曲线、热影响区温度曲线以及温度分布。焊后在垂直于焊接方向上切割取样,经打磨、抛光、腐蚀后,用 OLYMPUS PMG3 金相显微镜观察焊缝截面形貌。

2 试验结果

2.1 不同活性剂作用下焊缝截面的宏观形貌

图2为不使用活性剂与使用3种不同活性剂化合物的激光-TIG焊焊缝熔深的对比。通过观察和测量数据可知:不使用活性剂时,焊缝熔池焊缝熔深较浅,焊缝宽度较宽,熔池与母材所成的角度较小且焊缝表面存在凹陷,焊缝熔深仅为2.83mm,熔宽10.94mm。不同的活性剂化合物对焊缝熔深的影响程度不同,其中使用 SiO_2

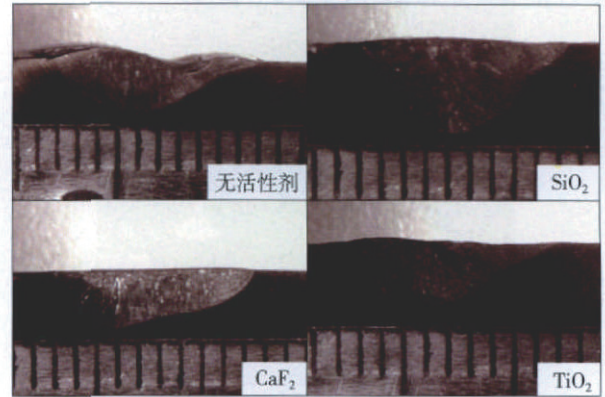


图2 不同活性剂下焊缝宏观形貌对比
Fig.2 Macrostructures of welding seam with different fluxes

时熔深最大,为4.16mm,熔宽收缩明显,为9.02mm,熔池与母材所成角度较大,熔池形状呈现半球状,接近熔池底部的地方有明显的喇叭口收边; TiO_2 作用效果也比较明显,熔深达到3.43mm,熔宽9.87mm。 CaF_2 增加效果并不显著,但是焊缝表面成形良好,熔宽9.42mm。 SiO_2 、 TiO_2 、 CaF_2 相对于无活性剂的熔深比分别是:1.47、1.21、1.08。由此可见,不同的活性剂组分对不锈钢激光-TIG复合焊缝熔深产生不同程度的影响。

2.2 不同活性剂作用下的电弧形态

在焊接过程中,采用 panasonic 专业数码相机对使用和不使用活性剂时的电弧形态均进行了记录,并对所拍摄到的电弧形态照片用 matlab 软件的图像处理工具箱进行二值化处理。图3和图4为沿垂直于焊缝轴线拍摄到的激光-TIG复合焊电弧形态和二值化处理图。

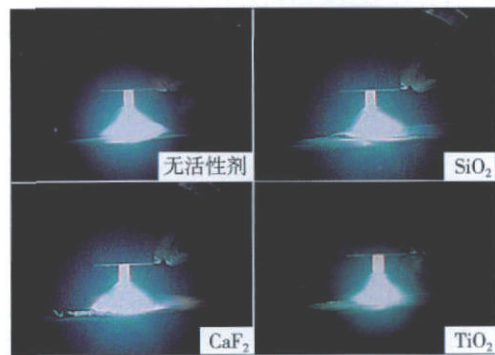


图3 不同活性剂下激光-TIG复合焊电弧形态
Fig.3 Arc shapes of laser-TIG hybrid welding with different fluxes

对比图3中电弧形态可以发现,无活性剂时的电弧弧根相对发散,弧光面积很大,像素值为1742。活性剂的加入明显使得电弧直径发生收缩,进而使得弧光面积整体变小,同时电弧的灼目感增强。结合测得的二值化图的光弧面积像素值可知, SiO_2 和 TiO_2 的电弧收缩现象比较明显,它们的电弧面积像素值分别为:1346、



图4 不同活性剂下激光-TIG复合焊电弧形态二值化图
Fig.4 Arc shapes binarization of laser-TIG hybrid welding with different fluxes

1 392、而 CaF_2 的弧光面积减少的并不显著,像素值为 1 583。通过试验还发现,涂敷 SiO_2 时电弧向后偏转,会在工件表面发生轻微的拖弧现象。由此可知,活性剂的加入显著的影响着电弧弧柱区的尺寸和形状,从而影响着电弧对金属的熔透能力。

2.3 不同活性剂作用下焊缝温度曲线

图5所示为传统无活性剂焊接的焊接特征点温度分布曲线。图中实线A为焊缝中心以下测温点A随着焊接热源移动的温度变化曲线,实线B为与A点相对的焊接热影响区以下测温点温度变化曲线。

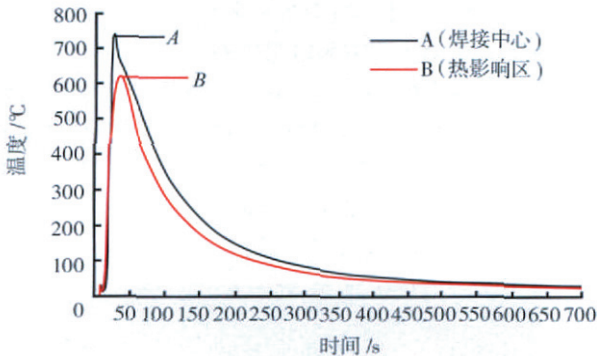


图5 无活性剂激光-TIG复合焊温度曲线
Fig.5 Welding temperature of laser-TIG hybrid welding without flux

从图中可以发现,随着焊接热源的不断移动被测点温度逐渐升高,焊缝中心区域和热影响区先后经过 23s 和 31s 达到曲线峰值温度,分别为 745°C 和 583°C。焊缝中心升温速率为 32°C/s。随着焊接热源的远离进入焊接降温冷却阶段。如图所示在焊接降温阶段两曲线总体趋势也基本保持相同。焊接过程在 450s 附近达到了动态热平衡,即 2 条温度曲线几乎重合。700s 时测温点温度降为室温,可见降温速度较快。

图6所示为涂敷不同活性剂的复合焊接焊缝中心区温度曲线对比图,从图上我们可以直观的看出,随着活性剂的加入,温度曲线的升温速率更快,峰值温度过后,降温阶段的温度冷却曲线更平滑。其中, SiO_2 活性

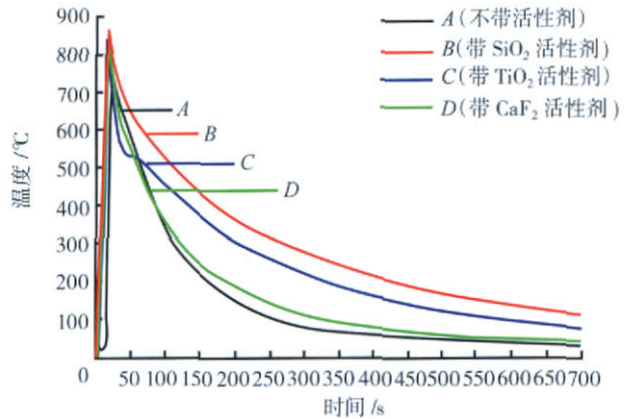


图6 不同活性剂的复合焊接温度曲线对比图
Fig.6 Comparison of hybrid welding coated with different fluxes

剂的曲线特征最为明显。

相比较于图5无活性剂时的温度变化曲线,从图6中我们发现活性剂焊接时,焊缝中心区的升温速率明显提高,且峰值温度较无活性剂时均提升显著。其中, SiO_2 焊缝中心区经过 19s 达到曲线峰值温度 871°C,升温速率达 46°C/s,在焊接冷却阶段测温点的冷却速度很慢,经过 700s 焊接温度仍然保持在 105°C,这比无活性剂焊接的降温速度要慢很多。 CaF_2 焊缝中心区经过 18s 达到曲线峰值温度 817°C,升温速度相对较快,升温速率为 45°C/s。 TiO_2 焊缝中心区经过 16s 达到曲线峰值温度 839°C,升温速率高达为 52°C/s。

3 分析讨论

目前活性剂对激光-TiG复合焊接的作用机理一般表现在 3 个方面:(1)活性剂作用于电弧,使电弧收缩;(2)活性剂作用于熔池,改变了电弧作用下熔池金属表面的表面张力梯度,增加熔深^[7],但本文所选活性剂元素受该因素影响不大,所以不予考虑;(3)活性剂对激光等离子体存在抑制作用,增加了工件表面对激光的吸收率^[6]。

从试验结果可以明显看出,激光-TiG焊接中活性剂增加熔深的机理并非一种。不同活性剂的作用机理也不相同,如 SiO_2 、 TiO_2 在增加熔深的同时熔宽也有明显减小,而 CaF_2 则在增加熔深效果不太明显,而熔宽却有所减小。

产生差异的原因在于,一方面激光束照射到工件表面时,会发生激光的吸收和反射。这 2 种作用的强弱与工件的表面状况和表面温度有关。活性剂的存在使得激光首先照射到工件表面活性剂细颗粒涂层上,由于细颗粒对激光的反射小,而且颗粒表面形状不规则,使散射的激光被其它颗粒吸收,这样便提高了激光的利用

率,增加了焊缝热输入,从而使焊缝熔深有显著增加。活性剂种类不同,作用效果也不同。

另外一方面,以电弧形态为参考对象,根据电弧收缩理论,由于 SiO_2 的电阻率较大,因此电弧在 SiO_2 上形成导电通道即阳极区的难度较大。当其覆盖在母材表面、电极正下方形成熔池后,电弧阳极区即电弧弧根扩展需要克服较大的阻尼,而电弧阳极斑点容易在纯金属处形成,能量平衡的结果造成电弧的自动收缩,并导致出现拖弧现象,结果是热量集中、电弧集中,使 TIG 焊的热输入增大。同时,由于活性剂原子蒸发吸附激光作用工件产生的光致等离子体中的自由电子成为带负电的负粒子,由于负粒子的质量较大,运动速度变慢,并且游移在等离子体的边缘,最终一部分成为自由电子的运动背景,也有部分将消失在大气中。这时,等离子体的有效电子密度降低^[6]。这些作用在一定程度上抑制了等离子体对激光束的折射、散射等负效应,从而使到达工件表面的激光功率密度增加。由于活性剂的这种双重作用,最终导致升温速率和峰值温度极大提高,焊缝熔深增加显著,熔宽变窄。

按照上述解释, TiO_2 由于是金属氧化物,电阻率低,对电弧导电通道的阻尼小,电弧应该表现出未收缩。但是从拍摄到的电弧形态(图 3)和二值化图形电弧面积(图 4)却可以观察到涂覆 TiO_2 时电弧收缩明显。这是由于电弧收缩理论同时认为电弧收缩的程度取决于活性剂蒸气与电子结合的效率。而效率取决于 2 个方面:一是蒸气粒子与电子的结合力;二是蒸气物质的解离温度。与电子的亲合力越强,解离温度越高,则对电弧及阳极斑点的收缩作用越强烈^[8]。由于金属氧化物解离温度高, TiO_2 在蒸发解离过程中大量吸热,使得电弧中大量的解离能被吸收,就会导致电弧的被迫收缩。同时由于具有一定电子亲合力,所以 TiO_2 依然表现出较显著的电弧收缩现象。加上对光致等离子体的抑制作用有利于激光能量吸收,进一步促进了焊缝熔深的增加。

涂敷 CaF_2 并没有明显表现出增加焊缝熔深的效果,且弧光面积较大,电弧形态发散。这是由于 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 中硫、氧含量低,在 TIG 焊过程中,没有足够高的 $[\text{S}]$ 、 $[\text{O}]$,在焊接化学冶金反应中,钢中的合金元素(Cr、Mn 等)和杂质元素(Ca、Al 等)没能结合成高熔点的氧化物和硫化物而进入熔渣。又由于焊接过程中电弧的平均温度与电弧等离子体组成有着如下关系^[9]:

$$T_g = 1000U_i (\text{°C})。$$

式中 T_g 为电弧平均温度; U_i 为电弧气氛中各种原子的电离能。

所以工件表面涂上 CaF_2 后致使 Ca 等低电离能力的元素蒸发进入到电弧中,降低了电弧温度,并使电弧

发散,输入热量减弱。同时,由于卤族元素化合物对电子有很强的亲和力,并且有很好的吸热能力,使工件得到了更多的人射激光能量,提高了焊缝热输入。两者作用相互抵消,从试验不同活性剂的截面宏观形貌和焊缝中心区温度曲线对比也可知, CaF_2 复合焊接的效果并不理想。另外,由于 CaF_2 引起激光能量的输入量增加,起到控制电弧的作用^[10],使弧柱的电阻减小,场强降低,增加了电弧稳定性,因而焊缝熔宽有一定程度的减小。

4 结论

(1) SiO_2 、 CaF_2 、 TiO_2 都能不同程度地增加熔深,尤其是 SiO_2 可使熔深达到传统复合焊熔深的 1.47 倍,但 CaF_2 增加熔深的效果并不显著。

(2) 相同焊接参数时,对无活性剂,涂敷 SiO_2 、 CaF_2 、 TiO_2 四种情况下的电弧形态进行比较发现,活性剂的加入都能使得电弧直径发生收缩,其中 SiO_2 、 TiO_2 电弧形态变化明显。

(3) 结合电弧形态、焊缝宏观形貌以及温度曲线峰值温度综合分析发现,活性剂的加入使得激光-TIG 电弧复合活性剂焊接的焊缝中心测温曲线的峰值温度与焊缝熔深以及深宽比相应变化。作用效果从大到小依次是: SiO_2 、 TiO_2 、 CaF_2 。

(4) 3 种活性剂主要通过电弧收缩增强 TIG 的电弧挺度和能量密度,和减少光致等离子体对激光的屏蔽作用来达到增加焊缝熔深的目的。

参考文献

- [1] Claus B, Flemming O O. Review of laser hybrid welding. *Journal of Laser Application*, 2005, 17(1): 2-14.
- [2] Tusek J, Subanm. Hybrid welding with arc and laser beam. *Science and Technology of Welding and Joining*, 1999, 4(5): 308-311.
- [3] Lucas W, Howse D. Activating flux increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes. *Welding and Metal Fabrication*, 1996 (1): 11-17.
- [4] 杨春利. TiG 电弧活性化焊接现象和机理研究 (1). *焊接*, 2000(4):16-18.
- [5] Kuo M, Sun Z, Pan D. Laser welding with activating flux. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2001, 6(1): 17-22.
- [6] 马立彩,刘金合,谢耀征,等. 激光焊活性影响等离子体的初步研究. *电焊机*, 2005, 35(7):35-38.
- [7] Savitskij M M. Features of A-TIG welding of steels. *The Paton Welding Journal*, 1999, 12 (1): 24-31.
- [8] 许鸿吉,武丹,谢明. 活性化焊剂成分对 A-TIG 焊缝形成的影响. *大连铁道学院学报*, 2002 (4) :71-73.
- [9] 任雪婷. 不锈钢单组份活性剂 A-TIG 焊规范及活性机理的研究 [D]. 大连:大连交通大学. 2005.
- [10] 陈彦宾,陈杰,李俐群,等. 激光电弧相互作用时的电弧形态及焊缝特征. *焊接学报*, 2003, 24(1): 55-60. (责编 阳光)