

高功率光纤激光-TIG 复合焊接实验研究

李 飞 邹江林 孔晓芳 吴世凯 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 激光诱导的羽辉对高功率光纤激光焊接过程具有重大影响。采用 IPG YLS-6000 光纤激光器和 Fronius MagicWave3000job 数字化焊机进行了高功率光纤激光-非熔化极气体保护焊(TIG)复合焊接实验;通过高速摄像机记录焊接过程中羽辉和等离子体的形态,并利用体视显微镜观测焊缝的熔深和熔宽。研究了 TIG 电弧对高功率光纤激光焊接羽辉影响的基本规律,并分析了产生这种影响的主要机制。结果表明,高功率光纤激光-TIG 复合焊接熔深比单光纤激光焊接显著提高约 20%,且基本不受电流大小的影响,焊接熔宽随电弧电流的增加逐渐增大;在一定热源间距范围,复合焊接熔深和熔宽对其变化不敏感。电弧对羽辉的作用机制主要表现为高温的电弧能够气化羽辉中的微粒,从而显著削弱羽辉对激光的影响。

关键词 激光技术;光纤激光;羽辉;非熔化极气体保护焊电弧;复合焊接

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0503004

Experimental Research on High Power Fiber Laser-TIG Hybrid Welding

Li Fei Zou Jianglin Kong Xiaofang Wu Shikai Xiao Rongshi

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Laser-induced plume affects the process of high-power fiber laser welding. The effect of Tungsten Inert gas (TIG) arc on the plume characteristics and the welding results are investigated. An IPG YLS-6000 fiber laser and a Fronius MagicWave3000job digital welding machine are used in the experiment. The profile of the plume and the arc plasma are recorded by a high-speed camera. Furthermore, the weld depth and weld width are measured by a microscope. The fundamental law of TIG arc on plume induced in high power fiber laser welding is studied, and the main mechanism of this effect is analyzed. The results show that, the weld depth of hybrid welding significantly increases by about 20% compared with pure fiber laser welding, and almost isn't affected by arc current. The weld width gradually improves as arc current increases. The weld depth and weld width are insensitive to the distance between laser and arc within limits. The main effect of TIG arc on plume is the gasification of the particles in plume by high temperature TIG, so the influence of plume on laser beam significantly weakened.

Key words laser technique; fiber laser; plume; tungsten inert gas arc; hybrid welding

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引 言

随着高功率激光器的不断发展,激光焊接技术在材料连接领域起到的作用越来越显著。光纤激光器以其高效率,高功率,高光束质量,低运行成本,体积小和高加工柔性等优势,为激光焊接提供了一种优质的热源,能够实现高效的焊接^[1-4]。

激光诱导羽辉是高功率光纤激光焊接中一种基本的物理现象。Kawahito 等^[5]认为高功率密度光纤激光焊接诱导的羽辉是低电离等离子体,其温度约为 6000 K。Shcheglov 等^[6-7]在光纤激光焊接时,发现羽辉对探测激光能量的衰减可达 7%,从而提出羽辉对焊接过程具有重大影响;并认为羽辉是

收稿日期: 2013-11-14; **收到修改稿日期**: 2013-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(51275013,51175008)、国家科技重大专项(2013ZX04001-131)

作者简介: 李 飞(1986—),男,博士研究生,主要从事激光材料加工方面的研究。E-mail: hxly9977@163.com

导师简介: 肖荣诗(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事激光与材料相互作用、先进材料激光加工、激光加工新工艺、新方法 & 外围技术与系统等方面的研究。E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号: S0420111435)

由金属蒸气团聚的纳米颗粒而构成,这些颗粒通过吸收入射激光的能量影响焊接过程。Xiao 等^[8]采用吹除羽辉的方法直接证明了羽辉的存在严重影响焊接结果,分析并指出羽辉对光纤激光焊接过程和结果产生重大影响。根据已有的研究成果,本文拟通过采用添加电弧的方式,研究电弧对羽辉及焊接过程和结果的影响。

激光电弧复合焊接自 20 世纪 70 年代提出以来就受到了广泛的关注,其目的是充分利用激光和电弧的优势,避免单一热源焊接的一些缺陷和不足,同时大大降低了对坡口的准备和装配精度的要求,可以得到更高的焊接速度,更好的焊缝成形以及更少的焊接缺陷^[9-11]。当前,激光电弧复合焊接的研究已大量开展,研究较为深入的主要是 CO₂ 激光,由于光纤激光诱导的羽辉和 CO₂ 激光诱导的等离子体存在很大差别,且它们对入射激光的作用机制也存在显著差异^[12-14],因此,CO₂ 激光电弧复合焊接中的研究结果并不适用于光纤激光,有关光纤激光电弧复合焊接的研究还有待深入。另外,根据已有的研究结果可知,电弧对穿过其中的光纤激光的吸收和损耗是很小的,可以忽略不计^[15]。因此,在研究过程中可以不考虑电弧对光纤激光的影响,而只考虑电弧对焊接过程中羽辉的作用。

本文采用 IPG YLS-6000 光纤激光器和数字化非熔化极气体保护焊(TIG)焊机,进行了单光纤激光平板扫描焊接和激光-TIG 电弧复合焊接实验。通过高速摄像记录焊接过程中羽辉和等离子体的形态,利用体视显微镜测量两种焊接焊缝的熔深和熔宽,研究了 TIG 电弧对羽辉及焊接结果影响的基本规律。

2 实验方法

实验采用的 IPG YLS-6000 光纤激光器,额定功率为 6 kW,波长为 1.07 μm,光纤传输芯径和准直分别为 200 μm 和 200 mm,经焦距为 300 mm 聚焦系统聚焦后,获得的焦斑直径为 0.3 mm,运动系统为 KUKA 六轴机械手和运动平台。采用的 TIG 焊机为 Fronius Magic Wave 3000 job 数字化焊机, TIG 焊枪与工件的夹角为 60°,钨极直径为 2.4 mm,定义激光和电弧的热源间距为 D_{LA} ,文中未做说明时 D_{LA} 取 2 mm,焊接方向为激光在前电弧在后。对羽辉或电弧等离子体的观测,采用的是美国 PHOTRON Fastcam 1024R2 彩色高速摄像机。实验布置示意图如图 1 所示。

实验材料为工业纯铁,其尺寸为 100 mm ×

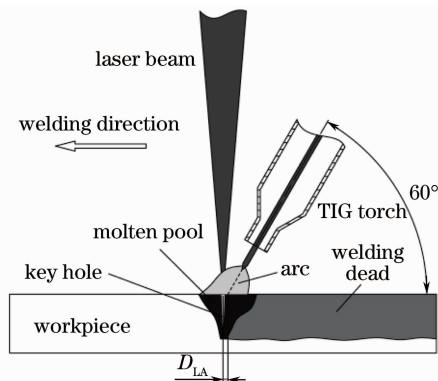


图 1 复合焊接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hybrid welding

50 mm × 10 mm。待焊表面统一处理,并在焊接前对其表面采用丙酮进行清洗。实验中光纤激光器输出功率为 5 kW,焊接速度为 3 m/min。高速摄像的拍摄频率为 500 frame/s。TIG 电弧采用直流正接的形式,工作气体选用氩气,经焊枪喷嘴送出,流量为 15 L/min;为避免气流对羽辉的影响,单光纤激光焊接时在大气环境下进行。各焊接参数重复实验 3 次,每个焊接试样在焊缝中部截取 6 个横截面,经磨抛并腐蚀后采用 OLYMPUS SZ61 型体式显微镜进行观察,使用配套的软件测量焊缝熔深和熔宽,取其平均值进行作图。

3 实验结果

3.1 电弧电流对焊接结果的影响

图 2 为典型的焊缝横截面图,其中电弧电流 I 为 0 时表示单光纤激光焊接,热源间距 D_{LA} 为 2 mm。由焊接结果可知,当加入一个较小的复合焊接电流 50 A 时,复合焊接熔深相比于单光纤激光焊接显著提高约 20%,此时焊接熔宽也相应提高。图 3 为电弧电流的变化对焊接熔深和熔宽的影响规律,结合图 2,可见随着电弧电流的增大焊接熔深的变化很小,但是熔宽随着焊接电流的增加逐渐增大,且电流越大增幅越显著。

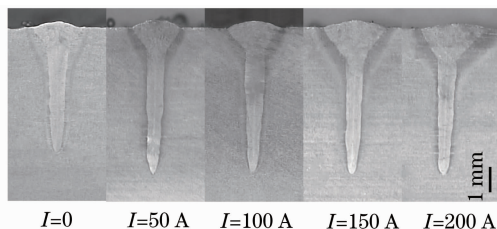


图 2 典型的焊缝横截面

Fig. 2 Typical weld cross section

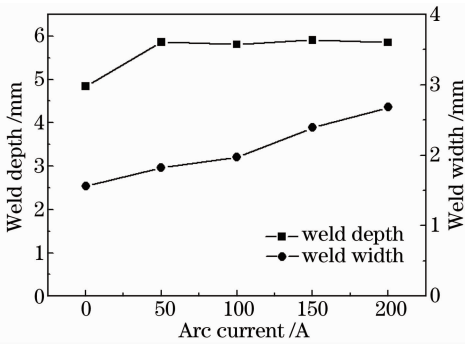


图 3 电弧电流对焊缝熔深和熔宽的影响

Fig. 3 Influence of arc current on weld depth and weld width

3.2 热源间距对焊接结果的影响

图 4 所示为焊缝熔深和熔宽随热源间距的变化规律,电弧电流为 100 A。热源间距小于 6 mm 时,复合焊接熔深比单光纤激光焊接有显著提高,增幅在约 20%,且在此范围内受热源间距的变化不敏感;当复合焊接热源间距继续增大到 8 mm 时,焊接熔深突然降低,和单光纤激光焊接熔深基本相当。在一定的电弧电流条件下,复合焊接焊缝熔宽受热源间距的影响不显著,相比于单光纤激光焊接熔宽有一定的提高。

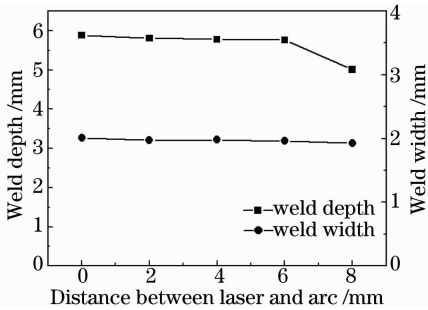


图 4 热源间距对焊缝熔深和熔宽的影响

Fig. 4 Influence of D_{LA} on weld depth and weld width

3.3 羽辉特征的变化

3.3.1 光纤激光焊接羽辉特征

图 5 所示为高速摄像采集的光纤激光焊接羽辉形态,其高度可达 80 mm。羽辉下端靠近小孔口处部分发出明亮的白光,其形态存在不规则的波动,高度一般小于 15 mm。羽辉上端部分亮度明显降低,始终近似为激光束的聚焦形态,在光束的入射方向上存在不连续现象。因此将羽辉定义为两部分,下端的不规则羽辉和上端的狭长羽辉。

3.3.2 TIG 电弧对羽辉特征的影响

图 6 所示为电弧电流变化对羽辉和等离子体形态的影响。复合焊接电流为 50 A 时,高速摄像获得的结果显示,与单光纤激光焊接相比,羽辉形态发生



图 5 光纤激光焊接羽辉形态

Fig. 5 Profile of plume in fiber laser welding

了显著的变化,在 TIG 电弧的作用下,上端狭长羽辉消失;随后不断增加电弧电流至 200 A,得到了一致的结果,即 TIG 电弧能够显著削弱羽辉,并呈现出以电弧等离子体为主体的形态,且下端不规则羽辉即小孔喷出的金属蒸气与电弧等离子体结合在一起。

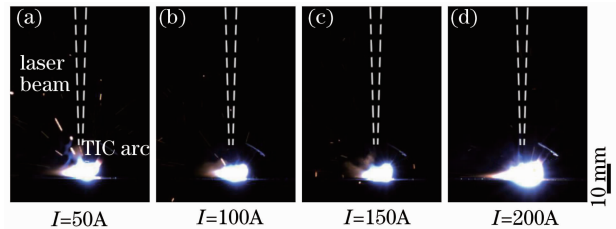
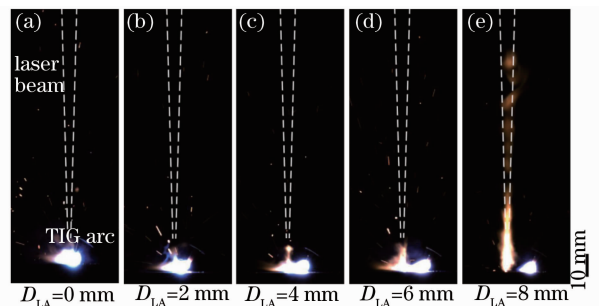
图 6 电弧电流对羽辉形态的影响 ($D_{LA} = 2$ mm)Fig. 6 Influence of arc current on plume ($D_{LA} = 2$ mm)

图 7 所示为不同热源间距下复合焊接等离子体和羽辉的典型形态。当热源间距小于 6 mm 时,在 TIG 电弧的作用上端的狭长羽辉显著削弱,复合焊接所呈现出的是以电弧等离子体为主体的形态;在激光入射处仍能观察到部分下端不规则羽辉形态。当热源间距增大到 8 mm 时,羽辉和电弧等离子体二者基本独立存在,呈现出清晰的电弧等离子体,以及羽辉的上下两部分形态,此时 TIG 电弧对羽辉的作用显著减弱。

图 7 热源间距对羽辉形态的影响 ($I = 100$ A)Fig. 7 Influence of D_{LA} on plume ($I = 100$ A)

4 分析与讨论

由实验结果可知,复合焊接熔宽随着电弧电流的增加逐渐增大,焊接熔宽的增加是由于电弧能量的引入造成的,随着电弧电流的增加,电弧的能量及作用面积增大,从而提高了焊缝上部的熔化面积,增加了熔宽。从熔深的变化规律我们发现,在较小的复合焊接电流(50 A)条件下,焊接熔深发生了显著的变化,比单光纤激光焊接提高约 20%,而随着电弧电流的持续增加复合焊接熔深几乎不再发生变化,说明复合焊接熔深的增加受电弧电流大小的影响较小。焊接熔深的增加同样是由 TIG 电弧的引入引起的,但是其变化规律与熔宽随电流的变化规律截然不同,这说明引起复合焊接熔宽和熔深变化的作用机制是不同的。

由图 5 可以看出,激光诱导的羽辉由下端的不规则羽辉和上端的狭长羽辉组成。根据下端不规则部分的波动属性,以及深熔小孔喷出波动的金属蒸气,可推测该部分为孔内喷出的金属蒸气发光;文献[7]认为小孔喷发的金属蒸气在空气中发生团聚形成大量纳米颗粒,并散布在焊接空间中。根据狭长形羽辉始终类似于激光束聚焦形态的特点,该部分羽辉可被认为是由于激光加热入射激光光路中的微粒,进而形成近似于激光聚焦形态的羽辉。文献[7]认为空间中的大量纳米颗粒将通过吸收入射激光,降低入射激光的能量,对焊接过程产生重大影响,并最终影响焊接结果。因此,削弱羽辉对焊接过程的影响,有助于提高激光的能量利用率,改善焊接结果。

已有的研究表明,光纤激光焊接羽辉的温度小于 6000 K,其温度远低于 CO₂ 激光焊接等离子体的温度,这被认为是羽辉中纳米颗粒团聚的主要原因^[5-7]。电弧等离子体具有较高的温度和能量,其温度远高于羽辉的温度。因此,添加电弧以后,高温的电弧等离子体必然不利于孔内喷出金属蒸气的团聚,从而大幅度的减少入射光纤激光光路中的微粒数量。实验结果可知,引入 TIG 电弧后上端的狭长羽辉显著削弱,且在不同电流条件下均获得了相同的结果,如图 6 所示,说明电弧能够起到显著削弱上端狭长羽辉的作用。电弧对羽辉的这种作用大大降低了羽辉对入射激光的衰减,从而提高了激光的能量利用率,引起焊接熔深的增加。

为进一步说明电弧对羽辉的作用及其对焊接结果的影响,在一定电流条件下,变化热源间距的实验表明,当热源间距小于 6 mm 时,电弧上方的羽辉显

著削弱,而且焊接熔深提高 20%,此范围内熔深对热源间距的变化不敏感;但是,当热源间距继续增大到一定程度时,电弧与羽辉的相互作用较弱,二者基本分离,此时焊接熔深仅比单光纤激光焊接略有增加。一定电流条件下,随着热源间距的增加,作用于小孔上方的 TIG 电弧温度逐渐降低,当热源间距增大到一定程度时,电弧对羽辉的这种作用显著降低,此时羽辉的形态和单光纤激光焊接时的形态基本相同,也就是说这种情况下电弧对羽辉的作用较弱,如图 7 所示。而且此时所获得的焊接熔深相对于单光纤激光焊接也没有明显的提高。由上述分析可知,电弧具有显著削弱羽辉的作用,降低羽辉对入射激光的衰减,提高激光的能量利用率,提高焊接熔深;也进一步说明了羽辉对高功率光纤激光焊接过程及结果产生重要影响。

电弧对高功率光纤激光诱导羽辉的作用机制主要表现为,高温高能量的 TIG 电弧对空间中的微粒和飞溅具有强烈的气化作用;同时高温的电弧能够阻止微粒发生团聚进入入射激光光路,进而阻碍了羽辉的形成。因此,在电弧的作用下,羽辉对入射激光的影响显著降低,从而提高了激光的能量利用率和焊接效率,并改善了焊接结果。

5 结 论

1) 高功率光纤激光-TIG 复合焊接熔深比单光纤激光焊接显著提高约 20%,且基本不受电流大小的影响,在一定范围内,对热源间距的变化不敏感;焊接熔宽随电弧电流的增加逐渐增大。

2) 高功率光纤激光-TIG 复合焊接,电弧的引入可以显著削弱上端狭长羽辉,从而显著降低羽辉对入射激光的影响,提高激光的能量利用率和焊接效率,并改善焊接结果。

参 考 文 献

- 1 S Ruppik, F Becker, F P Grundmann, *et al.*. High power disk and fiber lasers-a performance comparison [C]. SPIE, 2012, 8235: 82350V.
- 2 Y Kawahito, M Mizutani, S Katayama, Elucidation of high-power fibre laser welding phenomena of stainless steel and effect of factors on weld geometry[J]. J Phys D: Appl Phys, 2007, 40 (19): 5854-5859.
- 3 Zou Jianglin, Wu Shikai, Xiao Rongshi, *et al.*. Comparison of melting efficiency in high power fiber laser and CO₂ laser welding [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0803002.
邹江林, 吴世凯, 肖荣诗. 高功率光纤激光和 CO₂ 激光焊接熔化效率对比[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0803002.
- 4 Cai Hua, Kong Xiaofang, Xiao Rongshi. Effect of surface status on microstructures and solidification cracking susceptibility in

- laser beam welding of 2524 aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0203002.
- 蔡 华, 孔晓芳, 肖荣诗. 表面状态对 2524 铝合金激光焊接组织和结晶裂纹的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0203002.
- 5 Y Kawahito, N Matsumoto, M Mizutani, *et al.*. Characterisation of plasma induced during high power fibre laser welding of stainlesssteel[J]. Sci Technol Weld Join, 2008, 13(8): 744—748.
- 6 P Y Shcheglov, S A Uspenskiy, A V Gumenyuk, *et al.*. Plume attenuation of laser radiation during high power fiber laserwelding [J]. Laser Phys Lett, 2011, 8(6): 475—480.
- 7 P Y Shcheglov, A V Gumenyuk, I B Gornushkin, *et al.*. Vapor-plasma plume investigation during high-power fiber laserwelding [J]. Laser Physics, 2013, 23(1): 1—7.
- 8 Rongshi Xiao, Jianglin Zou. Studying on characteristics of plume/plasma in fiber laser welding and CO₂ laser welding [C]. 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO), 2012.
- 9 Xiao Rongshi, Wu Shikai. Progress on laser-arc hybrid welding [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1680—1685.
肖荣诗, 吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1680—1685.
- 10 A Mahrle, E Beyer. Hybrid laser beam welding-classification, characteristics, and applications[J]. J Laser Appl, 2006, 18(3): 169—180.
- 11 B Ribic, T A Palmer, T Debroy. Problems and issues in laser-arc hybrid welding[J]. Int Mater Rev, 2009, 54(4): 223—244.
- 12 Y Kawahito, K Kinoshita, N Matsumoto, *et al.*. Effect of weakly ionised plasma on penetration of stainless steel weld produced with ultra high power density fibrelaser[J]. Sci Technol Weld Joi, 2008, 13(8): 749—753.
- 13 Jay F Tu, Takashi Inoue and Isamu Miyamoto. Quantitative characterization of keyhole absorption mechanisms in 20 kW-class CO₂ laser welding processes[J]. J Phys D: Appl Phys, 2003, 36(2): 192—203.
- 14 T Moscicki, J Hoffman, Z Szymanski. Modeling of plasma plume induced during laser welding[J]. J Phys D: Appl Phys, 2006, 39(4): 685—692.
- 15 Wu Shikai, Xiao Rongshi, Yang Wuxiong, *et al.*. Characteristics comparison of laser-TIG arc interaction using high power CO₂ and Yb:YAG laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2667—2671.
吴世凯, 肖荣诗, 杨武雄, 等. 高功率 CO₂ 及 Yb:YAG 激光与 TIG 电弧相互作用特性对比[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2667—2671.

栏目编辑: 宋梅梅