

激光深熔 TIG 复合焊接参数对焊缝形貌的影响

肖镌璐¹, 朱加雷², 李伟¹, 冯聪¹, 李志波³, 李京洋²

(¹北京化工大学机电工程学院, 北京 100029; ²北京石油化工学院机械工程学院, 北京 102617;

³唐山开元焊接自动化技术研究所有限公司, 河北 唐山, 063000)

摘要 以 10 mm 厚度的 Q345B 钢板为母材, 针对激光深熔 TIG 复合焊接主要工艺参数对焊缝成形的影响规律开展系列研究, 为复合焊接工艺优化提供实验依据。实验结果表明, 激光对熔池起到了冲击和搅拌的作用, 提高了熔池的流动性, 形成了平整的焊缝, 同时焊缝的熔宽由电弧电流主导, 激光功率对焊接熔宽的影响较小, 焊接熔深会随着激光功率的增加而增加; 熔深和熔宽随着离焦量的增加(−2~3mm)均为先增大后减小; 激光在前的复合模式整体要比电弧在前的复合模式的焊接熔深大。

关键词 激光深熔 TIG 复合焊; 影响规律; 工艺参数; 焊缝成形规律

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20193903.423

Influence of Laser DP-TIG Hybrid Welding Parameters on Weld Morphology

Xiao Juanlu¹, Zhu Jialei², Li Wei¹, Feng Cong¹, Li Zhibo³, Li Jingyang²

(¹College of Electrical and Mechanical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

²School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;

³Tangshan Kaiyuan Welding Automation Technology Institute Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063000, China)

Abstract Taking Q345B steel plate with a thickness of 10 mm as the base material, a series of studies investigated the influence of main process parameters of laser-DP TIG hybrid welding on the formation of welding seams, so as to provide experimental basis for the optimization of composite welding process. The experimental results showed that the laser acts as a shock and agitation on the molten pool, which improves the fluidity of the molten pool and forms a flat weld, and weld width is dominated by arc current; the laser power has little change to the weld width, and the weld penetration depths increases with the increase of laser power; the welding melt depth as well as the width increase first and then decrease with the increase of defocusing amount(−2~3mm); the welding penetration is bigger while the laser is in front of the arc.

Key words laser-DP TIG hybrid welding; influence law; welding parameters; rule of weld molding

0 引言

随着社会的进步和经济的发展, 装备建造变得更加重型化和大型化, 在桥梁等大型钢结构中, Q345B 中厚型钢板是一种常用的钢材料, 因此, Q345B 中厚钢板高速高效焊接逐渐成为亟待攻破的技术难题^[1], 研究其焊接工艺具有十分重要的实际意义。上世纪末澳大利亚的学者发明了用于焊接中厚板的 K-TIG (Keyhole TIG Welding) 焊接方法, 它是在传统 TIG 焊的基础上通过提升焊枪的载流能力和压缩电弧以提高电弧压力的方式, 在熔池内部形成稳定小孔来达到增大熔深的目的, 并对不

锈钢等材料的厚板实现了无需开坡口的单面焊双面成形工艺^[2]。目前, 国外对 K-TIG 的原理、局限和其工艺参数对焊缝成形的影响均有研究^[3]; S. Lathabai 等通过实验表明, 使用 K-TIG 方法可以在不开坡口和添加填充焊丝的条件下, 成功实现对 6.35 mm 的工业纯铝的单面焊双面成形^[4]。

中国将 K-TIG 焊接技术引进国内后, 在其基础上进行了改良, 目前 K-TIG 焊在中国也叫深熔 TIG 焊或 DP-TIG 焊 (Deep Penetration Tungsten Inert Gas Welding), 经过国内外学者的研究也取得了大量的成果。兰州理工大学的张瑞华和栗海霞等

收稿日期: 2018-01-22; 收到修改稿日期: 2018-02-25

作者简介: 肖镌璐(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光电弧复合焊方面的研究。E-mail: fcxjl1218@163.com

人对 K-TIG 焊接电弧特性做了仿真模拟,结果表明焊接电流、钨极夹角和弧长对电弧压力的影响较大^[5-6];唐山开元焊接研究所对现有的 K-TIG 焊枪进行改进,加强了对钨极和焊枪的冷却,得到了现有的深熔 TIG 焊枪,大大提高了焊接速度和焊接效率^[7];天津大学的冯悦桥等人针对工业领域中广泛应用的不锈钢,对深熔 TIG 焊接工艺和接头质量进行了全面的分析,验证了深熔 TIG 的适用性和有效性^[8];黄逸飞等通过数值模拟,发现一定焊接参数下,深熔 TIG 焊接 8 mm 厚度异种钢能达到单面焊双面成形,得到成形良好的焊缝^[9]。

随着焊接技术的不断发展,激光与电弧复合焊接以其高熔深、高效率、高适应性、低成本的优势成为焊接领域的热门方向^[10]。如果能把激光焊和深熔 TIG 焊结合起来用于中厚钢板的焊接,则能同时具有激光焊及深熔 TIG 焊的优势,实现 $1+1>2$ 的效果。但是目前国内外对激光深熔 TIG 复合焊接的研究屈指可数,值得广大研究者去探索。本文针对激光深熔 TIG 复合焊接开展了一系列研究,得到了其主要工艺参数对焊缝成形规律的影响,为这种新型焊接技术的应用提供了实验依据,为其进一步的发展奠定了实验基础。

1 实验设备、材料与方法

本次实验采用的激光设备是美国 IPG 公司的 YLS-4 000 光纤激光器,最大激光功率为 4 kW,主要由激光焊接头、控制系统、激光器、水冷系统组成;焊枪为唐山开元自主设计的 DP-TIG 焊枪,激光器和焊枪实物图如图 1 所示;高速摄像机品牌为奥林巴斯,型号为 i-SPEED3,最高拍摄速度为 150 000 fps,拍摄镜头采用高性能尼康(Nikon) AF-S VR 105 mm f/2.8G IF-ED 微距镜头,如图 2 所示;试验平台为唐山开元自主设计的双轴伺服变位机和多功能焊接试验平台,可实现工件固定,包括变位机在内的多功能实验平台如图 3 所示。

试验使用的钢板为 Q345B,焊接保护气为 80% Ar+20% CO₂ 混合气体,气体流量 15 L/min,如无特殊说明,试验均采用焊枪垂直,激光倾斜 30 度,激光在前的复合方式,焊接速度采用 600 mm/min。

试验前用丙酮或者酒精去除试件表面油污,用角磨机和钢丝刷去除表面氧化膜。采用试件表面堆焊的方法,改变焊接电流 I 、激光功率 P_L 、离焦量 Δf 、光丝间距 D_{LA} 以及激光与 TIG 电弧的布置方式进行试验。每组焊接参数重复三次,并对三次试验

结果取平均值。焊接完成后,避开焊接起始和结束处的不稳定阶段,选取焊缝长度三分之一处进行取样,观察焊缝横截面宏观形貌并进行分析。

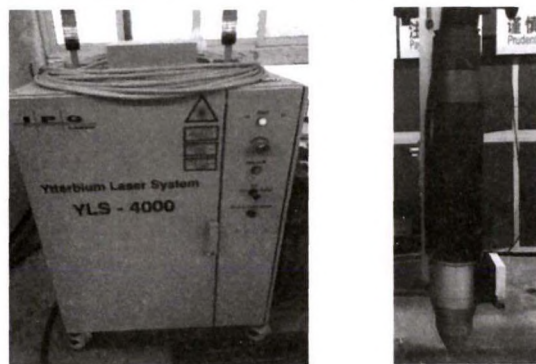


图 1 激光器设备(左)和焊枪(右)

Fig.1 Laser equipment(left) and welding gun (right)

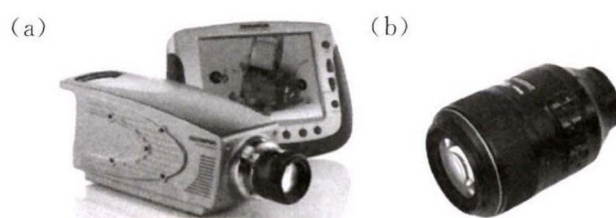


图 2 高速摄像

Fig.2 High-speed video

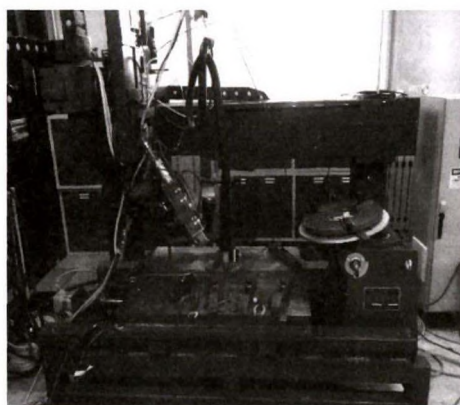


图 3 多功能焊接试验平台

Fig.3 Multifunctional welding test platform

2 激光 TIG 复合焊焊接原理分析

2.1 熔池状态分析

图 4(a)为单独深熔 TIG 焊在焊接速度为 600 mm/min 下的熔池照片,从图中可以看出,焊缝无法成形。焊接过程中,熔池液体快速冷却,离焊枪远的熔池凝固的越早。当焊接速度达到一定值时,熔池液体流速太慢,容易快速凝固,形成一个一个的“熔池瘤”分布在熔池表面。

图 4(b)为复合焊在焊速 600 mm/min 下的熔池照片,由图中可以看出复合焊的熔池宽度比图 4(a)中的熔池宽度大,熔池液体也能很好的铺展在焊接区域,熔池不易发生堆积和间断。

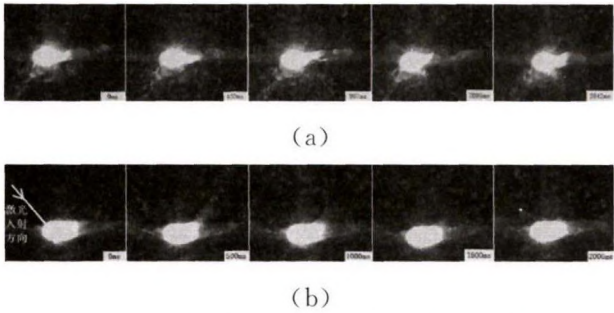


图 4 两种焊接方法在焊接过程中熔池形态对比
(a)深熔 TIG 焊熔池形态
(b)激光-深熔 TIG 复合焊熔池形态

Fig. 4 Comparison of weld pool morphology between two welding methods

由以上分析可知,单独深熔 TIG 焊在一定的速度下,熔池流动性差,焊缝不容易成形。加入激光后,激光对熔池起到了冲击和搅拌的作用,提高了熔池的流动性,形成了整齐平整的焊缝。由此可见,激光深熔 TIG 复合焊有利于焊缝成形,有效的提高了焊接质量。

2.2 焊接电流的影响

本组实验主要是在焊缝成形良好的基础上,探索对比了深熔 TIG 焊和激光深熔 TIG 复合焊中焊接电流对焊缝成形的影响规律。具体实验数据如表 1,影响规律折线图如图 5 所示。

表 1 单独深熔 TIG 焊和复合焊实验参数

Tab. 1 Experimental parameters of TIG and hybrid welding

激光功率 P_L	电弧电流 I	焊接速度 V_w
/kW	/A	/(mm/min)
—	100	600
—	200	600
—	300	600
—	400	600
—	500	600
1	100	600
1	200	600
1	300	600
1	400	600
1	500	600

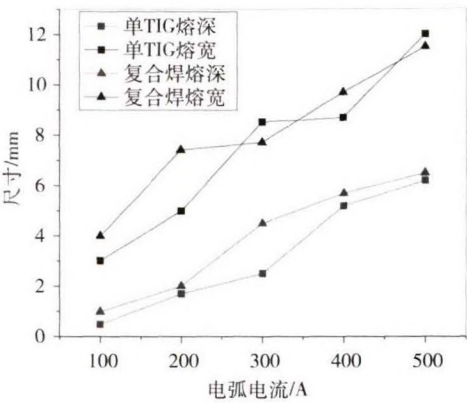


图 5 电流对焊缝成形的影响

Fig. 5 Influence of arc current on weld formation

由图 5 可知,单独电弧焊与复合焊的焊缝熔深、熔宽均随着焊接电流的增加而增大,且熔宽增加的幅度大于熔深。这是因为电弧的燃烧会随着焊接电流的增大而变得更加剧烈,而在整个焊接过程中,焊缝在进行表面横向扩散时,受到的阻力要小于纵向扩散,因此熔宽增加的幅度要大于熔深。在相同的电弧电流下,由于激光的能量较高,在进行复合焊时,TIG 焊的小孔深度会增大,因此复合焊焊缝的熔宽和熔深与单一 TIG 焊相比都会有显著的增大。

综上可知,激光深熔 TIG 复合焊和单一深熔 TIG 焊相比具有更好的成形效果,熔深和熔宽都有显著的增大。下面将针对激光 TIG 复合焊的工艺参数进行进一步研究,由本组实验可知,当电弧电流为 400 A 时,焊接效果较好,并且能源消耗降低,因此对其他工艺参数进行研究时,选 400 A 为电弧电流值。

3 激光 TIG 复合焊工艺参数研究

3.1 激光功率的影响

本组实验在确保其他焊接参数不变的情况下,通过改变激光功率的数值探索其对焊缝形貌的影响。具体实验数据如表 2,影响规律折线图如图 6 所示。

表 2 复合焊实验参数

Tab. 2 Experimental parameters of hybrid welding

激光功率 P_L	电弧电流 I	焊接速度 V_w
/kW	/A	/(mm/min)
1.0	400	600
1.5	400	600
2.0	400	600
2.5	400	600
3.0	400	600

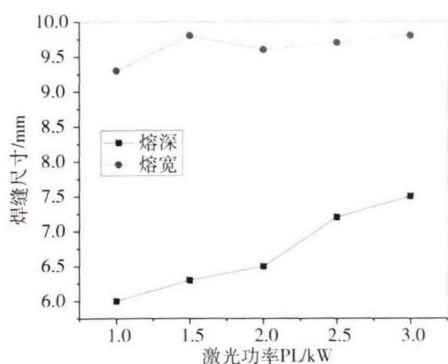


图6 激光功率对焊缝成形的影响

Fig. 6 Effect of laser power on weld formation

由图6可知,焊缝熔宽的变化对激光功率的改变依赖性小,这是由于在激光深熔TIG复合焊的过程中,激光主要起到的是引导电弧和供给热能的作用,对于熔宽的影响相比焊接电弧来说较小,因此对熔宽起主要作用的仍是电弧电流。与此同时,由于激光的引入,不仅提供了集中的能量,还能起到稳定电弧和搅拌熔池的作用,从而使得焊缝熔深有显著的增加。当激光功率达到2 kW以上时,熔深的增幅加大,说明激光和电弧的热耦合效果在该激光功率范围内有了明显的增强。

图7中的(a)、(b)、(c)图分别对应了在激光功率为0 kW、1 kW和3 kW时的焊缝表面的形貌图。从图中可以看出,不加激光时焊缝表面成形质量差,不连续;激光功率为1 kW时,激光的加入起到了搅拌熔池的作用,熔池流动速度加快,但是流动不充分,焊缝表面形态不平整;当激光功率为3 kW时,激光和电弧之间起到了充分的热耦合的作用,熔池搅拌充分,焊缝成形平整,没有裂纹、咬边等缺陷,因此当激光功率为3 kW时焊缝成形良好。

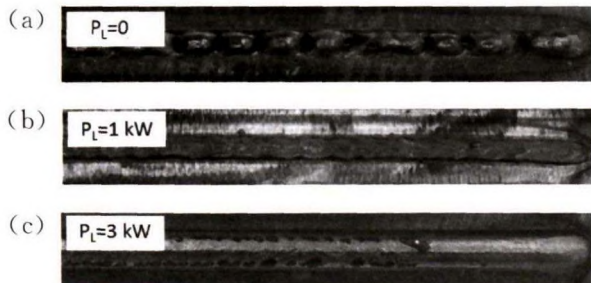


图7 不同激光功率下的焊缝表面形貌

Fig. 7 Weld surface morphology at different laser powers

3.2 离焦量的影响

本组实验在确保其他焊接参数不变的情况下,

通过改变离焦量 Δf 的数值探索其对焊缝成形的影响规律。具体实验数据如表3,影响规律折线图如图8所示。

表3 复合焊实验参数

激光功率 P_L	电弧电流 I	离焦量 Δf	焊接速度 V_w
/kW	/A	/mm	/(mm/min)
2	400	-2	600
2	400	-1	600
2	400	0	600
2	400	1	600
2	400	2	600
2	400	3	600

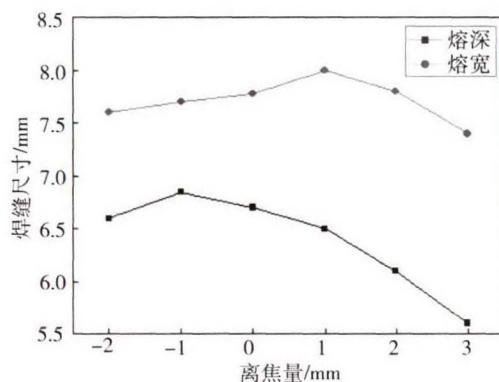


图8 离焦量对焊缝成形的影响

Fig. 8 Effect of defocus on weld formation

由图8可知,在一定的离焦量范围内,焊缝的熔深和熔宽均随着离焦量的增大呈现出先增加后减小的趋势。当 Δf 为1 mm时熔宽达到峰值,但是总体变化幅度较小,说明在选定参数范围内,离焦量的大小对焊缝熔宽的影响不大;当 Δf 为-1 mm时熔深达到最大值,且随着离焦量的增加,熔深减小的幅度相对较大,这是因为当激光在负离焦状态时,激光的焦点位于母材内部,当离焦量为-1 mm时,焦点正好位于熔池表面下方,此时,由于焦点附近的激光能量最高,从而为小孔焊接最大限度地提供了能量,使得熔深显著增加;而随着离焦量的增大,熔池表面的能量密度逐渐降低,用于小孔焊的能量变小,熔深也随之变小。综合熔深和熔宽的数据,离焦量 Δf 为-1 mm与0 mm时复合焊接的效果较好。

3.3 热源间距的影响

为了探究热源间距和前后位置对焊缝成形的影响规律,进行了10组复合焊接实验,工艺参数详见表4,影响规律折线图如图9所示。前5组实验为

激光在前复合模式,后5组实验为电弧在前的复合模式,参考离焦量的影响规律,本次实验离焦量 Δf 选取为 -1 mm 。

表4 复合焊试验参数
Tab. 4 Test parameters of hybrid welding

电弧电流 I/A	热源间距 D_{LA}/mm	离焦量 $\Delta f/\text{mm}$	焊接速度 $V_w/(\text{mm}/\text{min})$
400	0	-2	600
400	0.5	-2	600
400	1	-2	600
400	2	-2	600
400	3	-2	600
400	0	-2	600
400	0.5	-2	600
400	1	-2	600
400	2	-2	600
400	3	-2	600

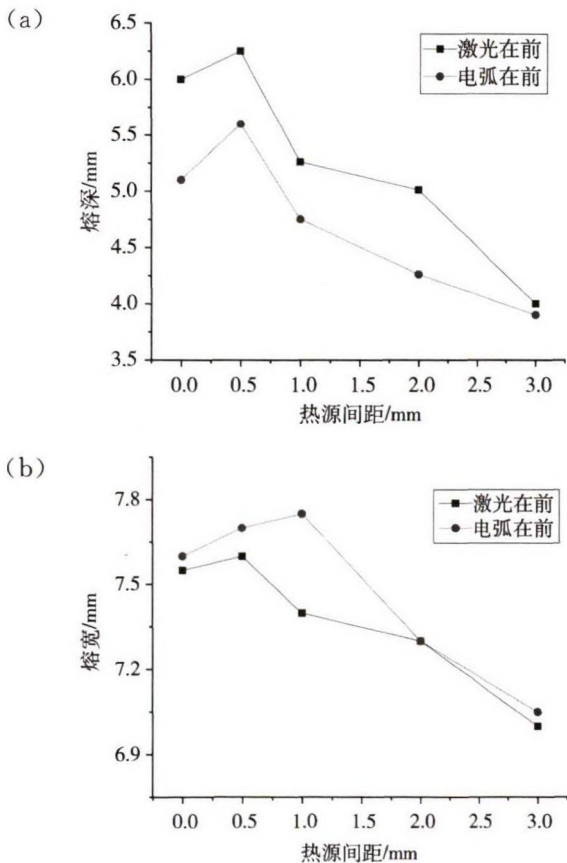


图9 热源相对位置对熔深及熔宽的影响
(a) 相对位置对熔深的影响
(b) 相对位置对熔宽的影响

Fig. 9 Influence of heat source relative position on penetration and width of composite welding

由图9(a)可知,在同一种复合模式下,当热源间距从 0 mm 开始增加时,焊缝熔深呈现出先增加后减小的趋势,这是因为当热源间距较小时,激光会因为穿过电弧中心的等离子体发生散焦,从而使本身的穿透能力下降,导致能量供给减少,焊缝熔深随之降低。当热源间距较大时,焊缝熔深又会因为激光和电弧两个热源的距离太远、热耦合作用下降而降低,极限情况下,与单独深熔TIG焊的结果一致。本次实验得出的熔深对应的最佳热源间距为 0.5 mm 。

由图9(b)可知,焊缝的熔宽也是随着热源间距的增加呈现先增加后减小的趋势,电弧在前的模式较激光在前的模式略宽一些,随着热源间距的增大,两种热源间的热耦合效果也逐渐减弱,熔宽逐渐降低,最终到趋于一致的状态。

总体而言,激光在前的激光—深熔TIG复合模式整体要比电弧在前的深熔TIG—激光复合模式的焊接熔深大,效果好,并且当热源间距为 0.5 mm 时,复合焊的焊接效果最好。

图10所示为在激光在前,电弧在后的复合方式下,热源间距分别为 0.5 mm 和 3 mm 时的焊缝成形情况,从图中可以看出,当热源间距为 0.5 mm 时,焊缝成形效果良好,焊缝表面光滑平整,没有明显缺陷;热源间距为 3 mm 时,焊接过程产生了飞溅的现象,焊缝出现咬边等缺陷。

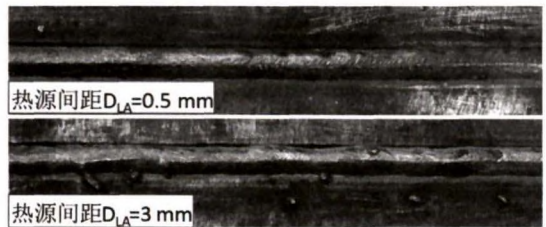


图10 复合焊焊缝
Fig. 10 Welds of hybrid welding

4 结论

通过对Q345B中厚板焊接实验研究,激光深熔TIG复合焊效果要明显优于单TIG焊,相关工艺参数对复合焊焊缝质量的影响规律如下:

- (1) 激光对熔池起到了冲击和搅拌的作用,提高了熔池的流动性,有利于形成光滑平整的焊缝;
- (2) 电弧电流主导焊缝的熔宽,焊缝的熔深和熔宽都随着电弧电流的增加而增加;
- (3) 激光功率对焊接熔宽的改变不大,焊接熔深会随着激光功率的增加而增加,且增加幅度较大,说

明激光能够起到稳定电弧和搅拌熔池的作用;

(4)焊缝的熔深和熔宽均随着离焦量的增加先增大后减小,且熔深的变化幅度要明显大于熔宽的幅度,当 Δf 为1 mm时熔宽取得峰值,当 Δf 为-1 mm时熔深达到最大值;

(5)复合焊接时的最佳离焦量为-1 mm~0 mm,最佳热源间距约为0.5 mm,当热源间距过大时便失去了复合的效果,激光在前、电弧在后的复合焊模式焊接效果更好。

参考文献

- [1] 唐立. 机械设备加工过程中厚板焊接工艺的应用[J]. 现代制造技术与装备, 2016(2):101-102.
- [2] Lathabai S, Jarvis B L, Barton K J. Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium[J]. Materials Science & Engineering A, 2001, 299(1):81-93.
- [3] Jarvis B L, Ahmed N U. Development of keyhole mode gas tungsten arc welding process[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2000, 5(1):21-1718.
- [4] Lathabai S, Jarvis B L, Barton K J. Keyhole gas tungsten arc welding of commercially pure zirconium[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2008, 13(6): 573-581.
- [5] 张瑞华, 栗海霞, 李明, 等. K-TIG 焊接电弧特性的数值分析[J]. 电焊机, 2012, 42(12):7-11.
- [6] 栗海霞. K-TIG 焊接电弧特性的数值分析[D]. 兰州理工大学, 2011.
- [7] 刘自刚, 瞿怀宇, 曹瑞昌, 等. DP-TIG 焊接方法工艺研究[J]. 焊接, 2017(3):61-65.
- [8] 冯悦峤. 中厚钢板的深熔 TIG 焊工艺研究及温度场数值模拟[D]. 天津:天津大学, 2015.
- [9] 黄逸飞, 罗震, 敖三三, 等. 基于非对称热源的异种钢深熔 TIG 焊接数值模拟[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2):41-47.
- [10] 吴世凯. 激光-电弧相互作用及激光-TIG 复合焊接新工艺研究[D]. 北京:北京工业大学, 2010.