

316L不锈钢PAW-TIG复合焊接的研究

曹润平¹,王克勇²,齐勇田²

(1.包头职业技术学院 材料工程系,内蒙古 包头 014030;2.合肥职业技术学院 机电工程学院,安徽 合肥 230012)

摘要 采用等离子弧焊PAW和氩弧焊TIG组合的焊接方法,在6 mm厚的316L不锈钢板上进行焊接对接试验,研究在最佳工艺参数下焊接接头的表面成型、显微组织及力学性能。结果表明:采用PAW+TIG组合焊接工艺,在不开坡口的情况下,6 mm不锈钢一次焊透,实现了单面焊双面成型;焊缝表面成型美观、热影响区窄小;焊缝组织主要由奥氏体和少量铁素体组成,其截面呈“漏斗”形;焊缝内部纯净,无缺陷,经100%RT无损检测合格。焊接接头的力学性能良好,工艺性能优良。

关键词 PAW+TIG复合焊;显微组织;力学性能;316L不锈钢;等离子焊

中图分类号 TG456.2

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2019)06-0029-05

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20190830.002

Hybrid PAW-TIG welding technology of 316L stainless steel

CAO Runping¹, WANG Keyong², QI Yongtian²

(1.Department of Material Engineering, Baotou Vocational & Technical College, Baotou 014030, China;

2.School of Mechanical & Electrical Engineering, Hefei Technology College, Hefei 230012, China)

Abstract In this paper, combined process of plasma arc welding (PAW) and tungsten inert gas welding (TIG) was used to 316L stainless steel of 6 mm thickness. Appearance characteristics, microstructure and mechanical properties of the joints were studied by PAW+TIG hybrid welding under the optimal process parameters. The results of combined welding test (PAW+TIG) with 316L stainless steel show that 6 mm stainless steel can be welded and formed by using one-side welding with back formation technology under the condition of no groove. Welding appearance of the joint was perfect, and heat affected zone (HAZ) was also smaller. The shape of cross section of the weld was like a funnel, and its microstructure was mainly composed of austenite and a small amount of ferrite in the center of weld. The inner part of the weld was free from defects, which passed 100%RT test. The welded joint had excellent technological and mechanical properties.

Keywords PAW+TIG; microstructure; mechanical properties; 316L stainless steel; plasma arc welding

不锈钢 SUS316L(新牌号 022Cr17Ni12Mo2)是一种超低碳奥氏体不锈钢,因具有良好的力学性能、耐高温及耐强酸腐蚀性能,近年来在压力容器、化学工业、海洋装置等领域得到广泛应用,如化工压力容器、不锈钢染整装置、化肥化纤及海水航海设备等^[1-2]。

316L不锈钢在加工制造中常需焊接,传统的焊接方法主要采用埋弧焊(SAW焊)、CO₂气体保护电弧焊(CO₂焊)、钨极氩弧焊(TIG焊)等,这些方法在实际生产中都存在一定的局限:SAW埋弧焊的线能量大、晶粒易粗化,致使构件性能下降,变形增大;CO₂焊的产品合格率低,焊接质量较难保证^[3-4];氩弧TIG焊虽然有成本较低、焊缝成型好等优点,但其在焊接厚板时存在焊速较慢、熔深较浅、穿透能力差、效率低等缺点。等离子焊(plasma arc welding, PAW)是高能束焊接,因具有熔深大、焊速快、热影响区(HAZ)窄、焊后变形小

等优点而被广泛应用于工业生产,但其与TIG电弧焊相比,又存在焊后焊缝外观成型较差等缺点^[5-9]。基于上述原因,作者将PAW和TIG焊有机结合起来,发挥两种方法各自的优势,通过优化焊接参数,对PAW+TIG复合焊(简称P+T)焊接工艺进行研究,实现不锈钢“等离子+钨极氩弧焊”(简称P+T)的自动焊接^[10-11]。作者采用P+T复合焊的加工技术对厚度为6 mm的316L不锈钢进行焊接,观察焊接接头的显微组织,对其焊接接头的力学性能进行测试,为实际生产提供技术参考依据。

1 方法

1.1 设备

用自动等离子焊接(PAW)+氩弧焊(TIG)组合的焊接系统,同时配有焊接辅助夹具—纵缝焊接操作机。

收稿日期:2019-02-19;修回日期:2019-08-27

基金项目:安徽省高等学校自然科学重点研究项目(KJ2019A1118);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY16460)

作者简介:曹润平,男,硕士,副教授;研究方向为焊接加工技术、高等职业教育管理。E-mail:949057462@qq.com。

通信作者:齐勇田,男,博士,教授;研究方向为焊接加工技术。E-mail:2638071673@qq.com。

焊接系统主要由等离子弧焊电源、TIG弧焊电源、一体化组合焊枪(带保护拖罩)、自动送丝装置、焊接行走机构、气路、水路循环系统、程序控制系统等部件组成。等离子(PAW)使用N450 DC等离子电源,钨极氩弧焊(TIG)使用常规的氩弧焊电源。为保证316L不锈钢PAW+TIG复合焊工艺顺利施焊,纵缝焊接专机配有琴键式的压紧机构和机械对中装置。

P+T型组合一体化焊枪示意图,见图1。其是两种焊枪(PAW焊枪、TIG焊枪)固定在一起,焊接时,PAW焊枪在前,TIG焊枪在后,两焊枪之间约有260 mm的间距。在TIG焊枪前安装有自动送丝装置,保证焊丝能够连续自动地送给熔池,从而提高生产效率。

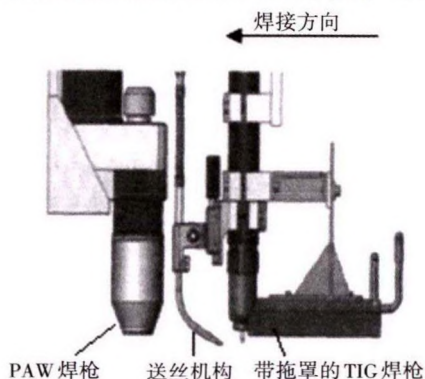


图1 P+T型组合焊枪示意图

Fig.1 Schematic diagram of PAW+TIG hybrid welding gun

1.2 试验材料

试验用母材是6 mm的316L奥氏体不锈钢板,每块钢板尺寸为500 mm×130 mm×6 mm(长×宽×厚),其中500 mm为焊道方向。焊丝选用316L不锈钢焊丝,直径为1.0 mm,化学成分及其力学性能,见表1、2。

表1 不锈钢316L的化学成分

Table 1 Chemical composition of 316L stainless steel

成分	质量分数/%	成分	质量分数/%
C	0.06	Ni	8.600
Cr	18.03	S	0.021
Mo	1.89	P	0.021
Si	0.40	Fe	Bal.

表2 不锈钢316L的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 316L stainless steel

参数	数值	参数	数值
屈服强度 R_{el}/MPa	205	伸长率 $A/\%$	40
抗拉强度 R_m/MPa	515	断面收缩率 $Z/\%$	50
冲击吸收功 A_k/J	206(25 °C)		

1.3 焊接工艺

1.3.1 焊前准备

由于316L不锈钢的板厚为6 mm,因此对接接头的坡口类型为I型,如图2所示。坡口端面应采用机械

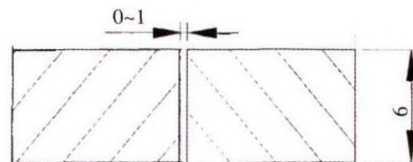


图2 焊前坡口形式(mm)

Fig.2 Structure of the groove before welding(mm)

加工方法进行加工,加工后端面应平直、无毛刺、凹坑等影响焊接质量的缺陷。焊前必须对坡口附近20 mm范围内的铁锈、水、油污、等杂质严格清理,否则焊后焊缝中易产生气孔、夹渣等缺陷。

由于等离子弧焊PAW属于高能束焊接,“小孔效应”作用显著,因此焊前工件的装配间隙对焊接接头的质量影响很大。在组对工件时,间隙尽可能小,考虑到焊缝的收缩,推荐值为0~1 mm。控制错边量是焊前组对的另一要求。过大的错边量不仅会使焊缝表面成型变差,严重的还会使焊缝无损检测无法通过。因此在组对焊接工件产品时,应尽可能减小错边量,要求错边0~1 mm。

本试验使用专门的工装夹具—纵缝焊接专机,对工件进行装配定位。施焊前,通过纵缝焊接专机的“对中装置”使待焊的焊缝与铜垫板的凹槽对中。然后用纵缝焊接专机中的“气动琴键式压紧机构”将被焊工件紧紧压在支撑轴的铜垫板上,将其定位固定,以防止工件在焊接过程中变形。为保证焊接质量,避免产生焊接缺陷,在工件两端外加引弧板及熄弧板,见图3。

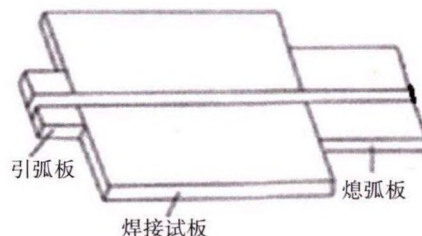


图3 焊接引弧板和熄弧板

Fig.3 Run-in and Run-off plates during welding

1.3.2 焊接保护

为获得质量优良的银白色焊缝,PAW+TIG组合焊接316L不锈钢时,不仅要使用较大的喷嘴加强对焊接高温区的保护,同时还配有“焊枪拖罩”对焊缝进行保护。为保证等离子电弧的稳定性,在惰性气体保护气中添加一定比例的 H_2 ,以提高等离子电弧的能量密度和压缩性能,改善湿润性和熔池流动性,从而提高电弧穿透能力。少量的 H_2 加入还可防止焊缝表面被氧化。由于 H_2 是还原性气体,在不锈钢焊接时,不仅容易获得外表呈银白色的焊缝,而且会使焊缝更光滑,鉴于此,本试验使用 $\text{Ar}+\text{H}_2$ 混合气体作为保护气体。

1.3.3 焊接参数匹配

PAW焊枪的喷嘴是铜质的水冷压缩喷嘴,喷嘴端到工件表面的距离为4~8 mm。为增强钨极的冷却效果,提高焊接速度并减小热影响区(HAZ)的宽度,使用三孔扩散式喷嘴。PAW焊枪与TIG焊枪均使用钨钨电极。喷嘴、电极的参数,见表3。

表3 喷嘴和电极的参数

Table 3 Parameters of the nozzle and the electrode			
参数	数值	参数	数值
喷嘴孔径/mm	3.2	喷嘴类型	三孔扩散
孔道比	10.0	电源极性	直流正接
钨极直径/mm	3.2	钨极内缩量/mm	1.5~2.5

PAW+TIG组合焊时,焊接质量因素主要有焊接电流、电弧电压、焊接速度、送丝速率等,其对焊接过程和焊缝成型影响很大,本试验优化的最佳的工艺参数,见表4。

表4 PAW+TIG组合焊的焊接工艺参数

Table 4 Parameters of PAW+TIG hybrid welding process					
参数	水平1	水平2	参数	水平1	水平2
焊层	打底焊	盖面焊	电弧电压 U/V	27~29	14~16
焊接方法	PAW	TIG	焊接电流 I/A	210~250	230~260
送丝速度/ (m·h ⁻¹)	—	12.6~13.8	焊接速度 v/(m·h ⁻¹)	14.4~15.6	14.4~15.6

在PAW+TIG焊接过程中,等离子气、保护气的流量应有合适的比例,过大或过小均会使保护效果下降。通过对P+T组合焊工艺参数的多次试验,选用纯Ar作为等离子气,95%Ar+5%H₂混合气体为正面焊缝的保护气,纯Ar作为背面保护气。所用的气体种类和流量,见表5。

表5 PAW+TIG焊接用气体种类及流量

Table 5 Type and flow of gases used in PAW+TIG welding		
参数	气体(质量分数)	流量/(L·min ⁻¹)
等离子气	99.99%Ar	8~12
PAW焊枪保护气	95%Ar+5%H ₂	15~25
TIG焊枪保护气	95%Ar+5%H ₂	15~25
拖罩保护气	99.99%Ar	10~15
背面保护气	99.99%Ar	10~15

1.3.4 施焊

PAW+TIG复合焊,以PAW作为打底焊,先行焊接,TIG焊紧随其后,填充盖面。焊接过程,见图4。

PAW是利用等离子弧较强的小孔穿透能力,在保证单面焊双面成型的同时,尽量提高焊接速度,然后通过TIG自由电弧良好的覆盖能力,再配上适量的填充金属,达到正面、背面均稳定成型。焊接极性采用直流正接,即工件接正极,钨极接负极。施焊时两电

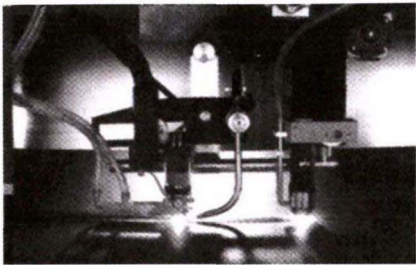


图4 PAW+TIG复合焊接过程

Fig.4 Welding process of PAW+TIG hybrid welding methods

弧之间也不存在相互干扰,焊接过程稳定。

1.3.5 显微组织观察

使用线切割设备将焊接接头的横断面切割成符合要求的试样尺寸。为防止焊缝金属过热,切割过程中用水冷却。较小的金相试样需镶嵌后,再进行粗磨、细磨、抛光等加工,抛光清洗之后,采用FeCl₃+HCl水溶液将金相试样浸蚀10~20 s,用光学显微镜(奥林巴斯GX51金相显微镜)对焊接接头的显微组织进行观察。

1.3.6 力学性能试验

焊接结束后,按GB/T 2651规定,用万能试验机对组合的焊接头进行室温拉伸试验。试样数量为2件。

弯曲试验按GB/T 2653规定,用万能试验机对组合的焊接头进行弯曲试验。从试件上取样、加工。正弯和背弯各2件试样,弯角180°。

2 结果及分析

2.1 外观检查

316L不锈钢采用PAW+TIG组合焊得到的焊缝,如图5所示。正面较宽的焊缝,是TIG焊填丝盖面所得,可以看到,TIG焊缝呈银白色,表面光滑平齐,半椭圆状的鱼鳞纹均匀细密,焊趾整齐,熔宽大小一致。熔

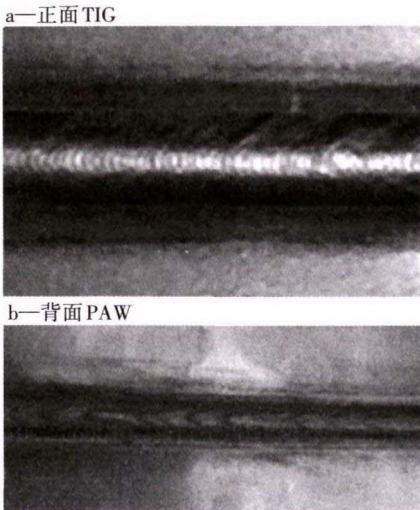


图5 P+T复合焊缝的外观形貌

Fig.5 Appearance of welded joint by PAW+TIG hybrid welding

合区(线)清晰可见,未有飞溅、咬边、未熔合产生。焊缝表面按NB/T 47013.5—2015标准进行PT渗透检测,未发现裂纹和气孔等缺陷。背面较细的焊缝为PAW打底焊缝,表面成型尚可,但不及正面焊缝成型光滑美观,焊道上的鱼鳞条纹较为粗糙(图5b)。由于PAW焊缝焊接时采用纯氩气进行保护,因此背面焊缝及热影响区表面颜色多呈蓝色。PAW打底焊缝有过渡的“滴”状,这是由于等离子弧焊单面焊双面成型时,小孔效应作用的结果。焊缝余高在0.5~1.0 mm内,PT渗透检测,未发现有缺陷产生,说明单面焊双面成型质量良好。

2.2 显微组织

2.2.1 焊缝的显微组织

在P+T复合焊接过程中,由于等离子焊PAW和钨极氩弧焊TIG两工艺原理不同,所以对焊缝组织影响规律也有所区别。P+T组合焊的焊接接头截面呈“漏斗”形状,如图6所示。

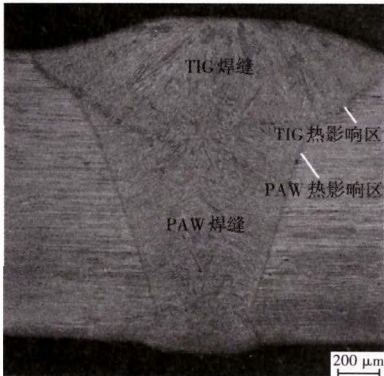


图6 P+T 复合焊接接头的横截面

Fig.6 Cross-section shape of the welded joint by PAW+TIG hybrid welding

全焊透的焊缝由2层焊缝组成。最上面的焊缝为TIG填丝盖面焊,其焊缝形状和常规TIG熔焊的形状相似。由于TIG焊在焊接时填充了焊丝,所以此焊缝的熔宽相对较宽,为10~11 mm。下面的焊缝PAW是打底焊,顶部最宽,中间逐渐变窄,底部又稍稍变宽,呈“杯子”形状,最大熔宽处为5~6 mm。全焊透的焊缝(TIG焊缝和PAW焊缝)的显微组织,如图7所示。可以看出:TIG盖面焊和PAW打底焊焊缝中心处的显微组织由奥氏体+少量的铁素体组成,但形态差异较为明显^[12~14]。TIG焊缝的显微组织形貌特征多呈条带状连续分布(图7a),而PAW焊缝则主要由粒状的等轴晶组成,晶粒生长的方向性较强(图7b)。这是因为在等离子焊PAW焊缝中心,温度分布相对均匀、梯度小,利于等轴晶的生成^[3,15]。

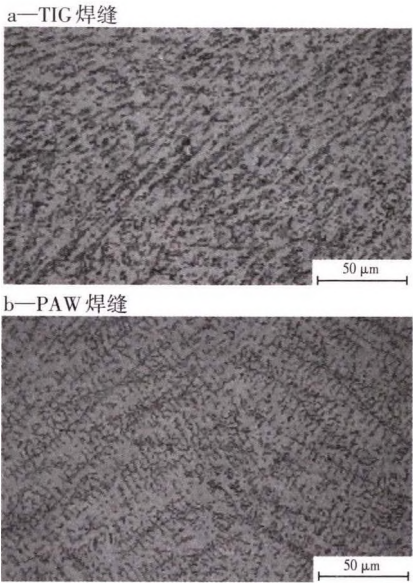


图7 316L不锈钢P+T复合焊焊接接头中心处显微组织
Fig.7 Microstructure at the center of the welded joint by PAW+TIG hybrid welding for 316L stainless steel

2.2.2 热影区(HAZ)的显微组织

图8是TIG盖面焊缝、PAW打底焊缝与母材连接接头的金相照片。TIG氩弧焊熔合区附近的显微组织主要由两部分组成:网状的奥氏体和少量的δ-Fe铁素体。PAW等离子焊熔合区附近的显微组织以等轴的奥氏体晶粒为主,且含有少量的铁素体。在母材和熔合区附近,两焊缝都与母材熔合优良,但形成的热影响区宽窄却有差异。相比之下,TIG焊焊接接头热影响区较宽,宽度为45~55 μm(图8a)。主要因为TIG焊

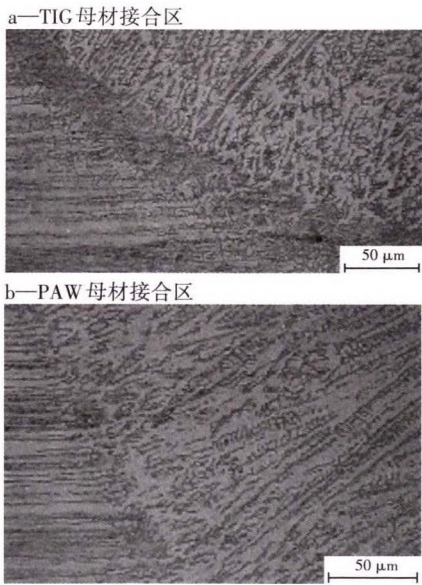


图8 不同焊接方法焊接接头显微组织
Fig.8 Optical microscope photos of welded joints by different welding methods

的电弧发散,其热量不像PAW焊那样集中,又由于PAW先焊,TIG后焊,顺序不同,PAW焊接会对TIG焊所形成的焊缝有“预热”作用,二次热循环使TIG焊的热影响区变宽。PAW焊接接头的热影响区稍窄,其宽度约为20 μm(图8b),这种窄区域特征的形成由等离子焊接的特点和工艺参数决定。PAW电弧收敛,能量集中,母材受热范围较小,热影响区较窄。

2.3 无损探伤

施焊后,对316L不锈钢的对接焊缝进行100%射线检测(RT),未发现圆形与条形缺陷,说明焊缝内部纯净,质量优异。表面也无未焊透、未熔合、裂纹等缺陷,检测结果符合NB/T 47013.2—2015的Ⅰ级要求。

2.4 焊接接头的力学性能

2.4.1 拉伸试验

对316L不锈钢横向取试样1和2按要求分别进行拉伸试验,结果见表6。可知,两试样均断裂在远离结合面的母材处,断口为韧性断裂。P+T焊接接头抗拉强度分别为618、607 MPa,远高于316L不锈钢母材抗拉强度的下限值(515 MPa),即奥氏体不锈钢的P+T复合焊焊接接头的抗拉强度不低于母材,316L不锈钢焊接接头抗拉强度符合要求。

表6 焊接头拉伸试验结果

Table 6 Tensile test results of welded joints

试样编号	拉伸类型	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率/%	断裂位置
1	横向	618	63	母材
2	横向	607	61	母材

2.4.2 弯曲试验

弯曲试验按GB/T 2653规定要求进行,试验结果,见表7。P+T焊接接头面弯和背弯试样弯曲180°后,拉伸面上的焊缝和热影响区完好无损,未发现有裂纹产生,弯曲试验合格。

表7 焊接头弯曲试验结果

Table 7 Bend test results of welded joints

试样编号	厚度/mm	面弯 180°	背弯 180°	焊缝区
1	6.0	无裂纹	无裂纹	完好
2	6.0	无裂纹	无裂纹	完好

3 结 论

1) 采用PAW+TIG组合焊,在不开坡口的情况下,6 mm的316L不锈钢可以一次焊透,达到正面、背面均稳定成型,经100%RT射线检测合格,焊缝质量优良,实现了单面焊双面成型焊接。该方法既克服了单一TIG焊熔深浅、效率低的不足,又解决了单一PAW焊成形差的缺点,同时有效解决不锈钢焊接变形大的

难题。

2) PAW+TIG组合焊接接头与母材熔合良好。焊缝显微组织主要由奥氏体和少量的铁素体组成,其截面呈“漏斗”形。

3) P+T复合焊接由于两种方法先后施焊过程中的相对预热(PAW对TIG的预热)、后热(TIG对PAW的后热),使焊接过程的热循环更加均匀,形成的双相组织具有良好的抗裂性能。

4) 采用PAW+TIG组合焊方法焊接奥氏体不锈钢,工艺性能优良,焊接接头力学性能良好。

4 参 考 文 献

[1] 张燕浩. 等离子弧焊在S31603不锈钢容器中的应用[J]. 科技创新与应用, 2013(30): 111-112.

[2] 陈桂兰. 316L不锈钢高压管道的焊接技术[J]. 科技传播, 2013, 5(24): 183-184.

[3] 曹润平, 齐勇田. P-T复合焊接对单面焊接头成型和微观组织的影响[J]. 铸造技术, 2018, 39(12): 2827-2831.

[4] 严军, 曾晓雁, 高明, 等. 316L不锈钢激光-钨极惰性气体复合焊接工艺研究[J]. 激光技术, 2007, 31(5): 489-492.

[5] 董文宁, 陈国余. 高效等离子焊接技术及其应用[J]. 电焊机, 2007(9): 8-16.

[6] 闫兴贵, 李占勇. SUS304不锈钢等离子弧焊接[J]. 焊接技术, 2012, 41(9): 20-22.

[7] 张成铭, 韩晓辉, 宁海石, 等. 不锈钢薄板搭接等离子-MAG复合焊接工艺[J]. 电焊机, 2015, 45(9): 34-39.

[8] YAN J, GAO M, ZENG X. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by GTAW, laser and laser-GTAW hybrid welding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(4): 512-517.

[9] 曹朝霞. 焊接方法与设备使用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 162-168.

[10] 曹世杰, 张晓辉, 孙潇, 等. 纵缝等离子弧/TIG焊接系统[J]. 焊接技术, 2015, 44(2): 58-60.

[11] 林耀华, 李加良, 武永亮, 等. 等离子弧与钨极氩弧复合焊(P+T)技术应用研究[J]. 金属加工(冷加工), 2016(S1): 606-608.

[12] TABAN E. Joining of duplex stainless steel by plasma Arc, GTAW and plasma Arc + GTAW welding processes[J]. Advanced Manufacturing Processes, 2008, 23(8): 871-878.

[13] LIU Kun, LI Yajiang, WANG Juan. Microstructure and low-temperature mechanical properties of 304 stainless steel joints by PAW+GTAW combined welding[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(10): 4561-4573.

[14] 王锡岭, 左松, 许祥平. 不锈钢PAW+GTAW组合焊接头微观组织与性能研究[J]. 焊接技术, 2016, 45(5): 123-125.

[15] 李亚江. 焊接冶金学-材料焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 121-131.