

S22053 双相不锈钢等离子弧焊工艺及接头性能

杜永勤,王书华,王 恒,张见祥

(南京宝色股份公司,江苏 南京 211178)

摘 要: 研究双相不锈钢使用和焊接性能,在等离子弧焊适应性基础上,采用小孔型等离子弧焊(PAW)、小孔型等离子弧焊(PAW)+自动钨极氩弧焊(GTAW)填丝盖面、小孔型等离子弧焊(PAW)+自动钨极氩弧焊(GTAW)填丝盖面+自动钨极氩弧焊(GTAW)自熔封底三种焊接工艺方案进行 S22053 双相不锈钢焊接工艺试验。通过无损检测、拉伸、弯曲、低温冲击、金相分析等方法对不同焊接工艺试件焊态接头质量、性能及组织进行分析研究。结果表明:三种焊接工艺完成的双相不锈钢焊接接头抗拉强度均高于母材,具有优异塑性、韧性和耐蚀性能,满足双相不锈钢使用要求;小孔型不填丝 PAW 接头力学性能耐蚀性能最好,在采用自动 GTAW 填丝盖面 and 自熔封底焊接后,接头韧性和耐蚀性能有一定下降。

关键词: 双相不锈钢; S22053; 小孔型等离子弧焊; 自动钨极氩弧焊; 接头性能

中图分类号: TF76 ,TG44 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2020)05-0147-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.05.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者
聊科研

PAW Welding Procedure and Joint Property of S22053 Duplex-stainless Steel

Du Yongqin ,Wang Shuhua ,Wang Heng ,Zhang Jianxiang

(Nanjing Baose Co. ,Ltd. ,Nanjing 211178 ,Jiangsu ,China)

Abstract: The welding procedure test of S22053 duplex-stainless steel is performed by the keyhole PAW , the keyhole PAW+ auto-GTAW with filler metal for cover pass and the keyhole PAW+ auto-GTAW with filler metal for cover pass+auto-GTAW without filler metal for root pass in order to study service and welding characteristic of duplex-stainless steel as well as PAW suitability. The quality ,properties and structure of these joints are analyzed by nondestructive examination ,tension ,bend ,low-temperature impact as well as metallographic tests. These joints made by three welding procedures show higher tension strength than S22053 base metal ,and excellent ductility ,toughness and corrosion resistance ,which meets the requirement of service characteristic for duplex-stainless steel. Compared with the PAW joint ,the toughness and corrosion resistance of the joint welded by auto-GTAW with the filler metal after PAW weld decrease to a certain degree.

Key words: duplex-stainless steel ,S22053 ,PAW ,GTAW ,joint property

0 引言

S22053 双相不锈钢作为典型含氮、超低碳 $\alpha+\gamma$ 双相不锈钢,通过提高铬、添加钼和氮,使其强度显著提高,一定含镍量保持材料良好塑性和韧性,兼顾

了 γ 和 α 不锈钢各自优点,成为有良好加工性能、焊接性及耐应力腐蚀、缝隙腐蚀、 Cl^- 点蚀、晶间腐蚀等优异耐蚀性能的高强度耐蚀压力容器材料,并逐步形成了以 S22053 为代表的双相不锈钢容器材料家族^[1]。作为在多个耐蚀应用方面逐步代替奥氏体或

收稿日期: 2020-05-18

作者简介: 杜永勤(1970—),男,陕西宝鸡人,研究生,高级工程师,副总工程师,长期从事有色金属及压力容器制品焊接工作。E-mail: dusiyu-98@163.com。

铁素体不锈钢的容器用钢,在同等承载条件下可显著降低容器壁厚,从而降低投资成本提高材料利用率,具有优异使用和经济性价值。双相不锈钢由于需要形成一定比例的双相组织、均匀的组织成分分布才能获得良好综合性能和耐蚀性能。焊接接头要求保证焊缝、热影响区耐蚀和冲击韧性,与母材相当,因此一般采用焊条电弧焊、埋弧焊和氩弧焊等方法,通过控制热输入和在填充金属中添加 Ni、N 等元素形成奥氏体占优势的焊缝金属,以保证焊缝合金成分、焊缝和热影响区 30%~55% 铁素体含量^[2]。不填丝双相不锈钢焊接,由于会造成合金元素烧损,尤其接头表面层受热部位氮损失,其次焊缝的奥氏体元素得不到补充,焊接冷却较快,焊缝金属和热影响区的铁素体含量急剧增加,导致氮化物和二次奥氏体析出,合金元素分布不均匀,致使接头韧性和耐蚀性能下降^[3],因而已有文献对小孔型 PAW、自熔 GTAW 等不填丝自熔方式在双相不锈钢中的焊接应用通常持谨慎态度,一般不予以推荐^[4]。为了进一步了解小孔型 PAW 双

相不锈钢工艺及焊接接头性能特点,采用小孔型 PAW 工艺、小孔型 PAW+填丝自动 GTAW 盖面工艺、小孔型 PAW+填丝自动 GTAW 盖面+不填丝自动 GTAW 封底工艺焊接双相不锈钢,对每种工艺焊接态的接头质量、力学性能及耐蚀性能进行比较,探索双相不锈钢小孔型 PAW 焊接及不填丝自动 GTAW 焊接工艺可行性,寻找适合双相不锈钢的小孔型 PAW 焊接工艺,以充分发挥小孔型 PAW 在薄板焊接方面的优势。

1 试验材料及设验方法

1.1 试验材料

母材: 国产 S22053 双相不锈钢,固溶,符合 GB/T24511,规格 500 mm×250 mm×8 mm。

焊接材料: 焊丝 ER2209,规格 $\varnothing 1.0$ mm,符合 NB/T47018.3; 气体为 99.99% 工业纯氩,符合 GB/T4842《氩》要求。

母材和焊丝化学成分如表 1 所示,母材力学性能如表 2 所示。

表 1 试验母材和焊丝化学成分
Table 1 Chemical compositions of base metal and welding rod

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Mo	Cu	Fe
母材标准值	≤0.03	≤1.0	≤2.0	≤0.03	≤0.02	22.0~23.0	4.5~6.5	0.14~0.2	3.0~3.5		余
母材实测值	0.022	0.55	1.23	0.029	0.001	22.58	5.16	0.17	3.11		余
焊丝标准值	≤0.03	≤0.9	0.5~2.0	≤0.03	≤0.03	21.5~23.5	7.5~9.5	0.08~0.2	2.5~3.5	≤0.75	余
焊丝实测值	0.016	0.54	1.77	0.02	0.003	22.5	8.7	0.19	2.82	0.08	余

表 2 试验母材力学性能
Table 2 Mechanical properties of base metal

项目	硬度(HB)	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	腐蚀试验
标准值	≤293	≥620	≥450	≥25	GB/T4334.E
实测值	252	782	597	32.0	合格

1.2 试验设备

1) 等离子弧焊接设备: 华恒焊接有限公司 LPT×38 控制系统,电源为 Tetrax 500 DC plasma comfort,自动钨极氩弧焊电源为华恒焊接 408 电源,额定电流为 500 A。

2) 等离子焊枪和自动钨极氩弧焊枪均为水冷焊枪,等离子枪喷嘴直径 $D=3.2$ mm,电极为铈钨极,型号为 WCe.20,等离子焊电极直径 $\varnothing 4.0$ mm,自动钨极氩弧焊电极直径 $\varnothing 3.0$ mm。

1.3 试验方法

1.3.1 坡口及组对

坡口采用机加工制备,坡口形式 I 型,组对间隙和错边量 0.5 mm,如图 1 所示。



图 1 试件坡口形式及组对
Fig. 1 Coupon groove type and fit-up

1.3.2 试件焊接

焊前对坡口及边缘 20 mm 范围内采用丙酮擦洗干净,无油污、灰尘等污物。

采用小孔型 PAW、小孔型 PAW+自动 GTAW 填丝盖面、小孔型 PAW+自动 GTAW 填丝盖面+自动 GTAW 自熔封底三种工艺分别焊接试板,试板编号分别为试验 1~3; 焊接过程中,焊接接头正面和背面高温区域均采用氩气进行保护,当试件需要盖面

或封底焊接时,在小孔 PAW 打底焊接结束后,待焊道温度降至 100 ℃ 以下再进行,具体焊接工艺及参数如表 3 所示。

1.3.3 检验和试验

每项试验试板按 NB/T47013 进行外观和射线检测,分别机加工制备接头拉伸、弯曲、焊缝和热影响区冲击、硬度及金相分析、点腐蚀及晶间腐蚀试样,按相关标准进行试验。

表 3 焊接工艺及参数
Table 3 Welding procedure and variables

试验编号	层次	焊接方法	I/A	U/V	v/ (cm·min ⁻¹)	保护气体流量/(L·min ⁻¹)			
						等离子气	保护气	背保护气	尾保护气
试验 1	打底 1	PAW	210~230	24~27	18~20	4.5~5.5	≥25	≥25	≥25
试验 2	打底 1	PAW	210~230	24~27	18~20	4.5~5.5	≥25	≥25	≥25
	盖面 2	GTAW	220~240	14~18	20~24		≥25	≥25	≥25
试验 3	打底 1	PAW	210~230	24~27	18~20	4.5~5.5	≥25	≥25	≥25
	盖面 2	GTAW	200~220	14~18	20~24		≥25	≥25	≥25
	封底 3	GTAW	180~200	14~18	20~32		≥25	≥25	≥25

2 试验结果及分析

2.1 无损检测

2.1.1 外观检查

图 2 为小孔型 PAW 接头和自动 GTAW 盖面或封底的接头外观形貌。图 2(a) 显示焊缝表面光滑,小孔型 PAW 正面焊缝呈中间高两侧稍低形貌,大部分焊趾处稍低于母材表面 0.2~0.3 mm,圆滑过渡到母材;图 2(b) 为小孔型 PAW 缝单面焊双面成

型背面焊缝形貌,焊缝呈圆弧形状,宽度和余高均在 1.0~1.5 mm,焊缝与母材表面在焊趾处成近似直角过渡;图 2(c) 为小孔型 PAW 正面经过自动 GTAW 填丝盖面和背面自熔焊接后的焊缝表面,焊波均匀,与母材过渡良好,外观成型优异,表面有黑色 NiO 等氧化皮状物质粘附在焊缝表面。图 3 为试验 2 试板在小孔型 PAW 焊接过程中正面焊缝一段单侧熔合不良形成的葫芦状焊缝及背面焊缝成型不规则的表面缺陷^[5-6]。

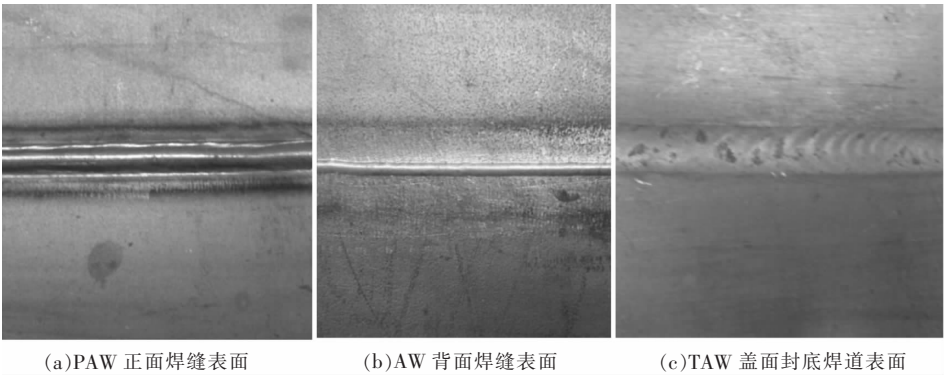


图 2 S22053 双相不锈钢的 PAW/GTAW 焊缝表面形貌

Fig.2 Weld surface profile of PAW/GTAW joint for S22053 duplex stainless steel

2.1.2 射线检测

按 NB/T47013.2 对试验 1~3 的三块试板分别进行 100% 射线检测和评定,小孔型 PAW 焊缝未有明显缺陷影像,每块试板两张底片均为 I 级合格,未发现气孔、未焊透、未熔合等缺陷。

从无损检测结果看,在焊接参数合理情况下,三种工艺制备的双相不锈钢焊缝内部质量优异。由于等离子弧扩散角小、电弧吹力大,双相不锈钢密度

大、流动性好等焊接方法和材料本身物理特点,以及焊件组对质量如间隙和错边、电弧与焊件不对中等现象存在,使小孔型 PAW 焊接完成焊缝正面表面呈现中间高两侧低,偶尔会造成咬边,焊缝背面表面呈窄而高的突起焊缝外观,表现为表面成型不良^[5],一般需要通过方便快捷易于控制质量的自动 GTAW 填丝盖面或自熔封底进行焊缝表面修饰予以改善。

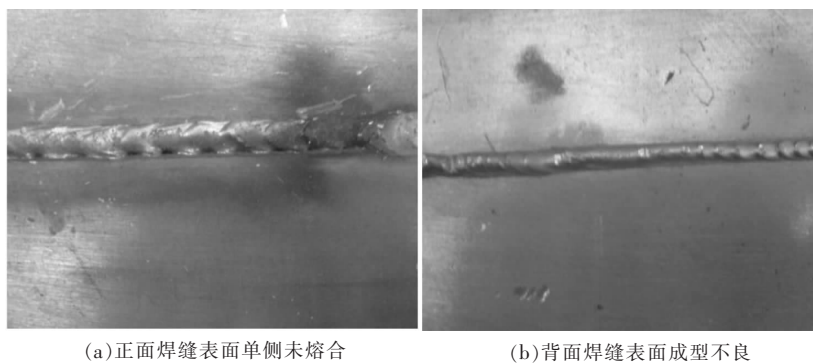


图 3 S22053 双相不锈钢等离子弧焊接头表面缺陷
Fig. 3 Surface flaw for PAW joint of S22053 duplex stainless steel

2.2 力学性能试验

1) 力学性能试验

采用试验 1~3 三块试板分别制备的板状拉伸、面弯/背弯及冲击试样,分别按 GB/T228.1、GB/T2653、ASTM A923 B 进行拉伸、弯曲及 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ V 型

缺口冲击试验,试验结果见表 4。

2) 硬度试验

对试验 1~3 分别制备的金相试样,在焊缝截面厚度中间部位进行硬度(HV10)测试,测试结果见表 5。

表 4 S22053 焊接接头力学性能
Table 4 Mechanical properties of S22053 welding joint

试验编号	拉伸试验			弯曲试验 $D=40\text{ mm}$ $\alpha=180^{\circ}$		
	试样编号	R_m/MPa	断裂性质及位置	编号	型式	结果
试验 1	1-1	839	塑性/焊缝	1-1-1/-2	面弯	合格
	1-2	834	塑性/焊缝	1-2-1/-2	背弯	合格
试验 2	2-1	833	塑性/焊缝	2-1-1/-2	面弯	合格
	2-2	834	塑性/焊缝	2-2-1/-2	背弯	合格
试验 3	3-1	832	塑性/焊缝	3-1-1/-2	面弯	合格
	3-2	846	塑性/焊缝	3-2-1/-2	背弯	合格

表 5 硬度试验结果
Table 5 HV10 hardness results

试验编号	硬度(HV10)				
	母材	左侧	焊缝	右侧	母材
试验 1	260	266	278	259	271
试验 2	258	260	277	258	262
试验 3	271	269	278	263	276

3) 冲击性能试验

每块试板的热影响区、焊缝分别制备 $5\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 55\text{ mm}$ 的 V 型缺口冲击试样,在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行试验,测定的吸收功和侧向膨胀量见表 6。

从力学性能试验结果看,三种焊接工艺条件的焊接接头均具有较高强度和良好的塑性和韧性。

双相不锈钢 S22053 标准规定最小抗拉强度为 620 MPa ,所使用母材 $R_m=782\text{ MPa}$,拉伸试验结果

$\geq 833\text{ MPa}$,且塑性断于焊缝,显著高于标准规定的最小值和母材实测值,表明三种工艺制备的焊接接头拉伸性能能达到与母材等强匹配。各组面弯和背弯试验,拉伸面将焊缝余高去除后进行试验,检查试样拉伸面未发现任何开口缺陷,表明接头具有良好延性和塑性。焊缝的硬度稍高,但与热影响区和母材差别小,间接表明焊缝、热影响区及母材强度性能差别极小。

表 6 焊缝热影响区冲击试验结果
Table 6 Charpy V-Notch impact test results of weld and HAZ

试验编号	焊缝		热影响区	
	冲击功/J	侧向膨胀量/mm	冲击功/J	侧向膨胀量/mm
试验 1	78/94/84	1.56/1.70/1.14	88/88/96	1.82/1.60/1.64
试验 2	88/86/76	1.84/1.74/1.32	44/48/44	1.02/0.92/0.98
试验 3	86/94/98	1.68/1.52/1.68	46/44/44	0.98/0.88/0.90

从表6试验结果看,试验1~3各组焊缝小试样(5 mm×10 mm×55 mm)的-40℃冲击试验吸收功的最小平均值达到83.3 J,单个焊缝冲击试样的最小值为76 J,按标准换算为标准试样(10 mm×10 mm×55 mm)冲击功为182 J和152 J;试验1热影响区冲击吸收功平均值较高达到90 J,试验2和试验3热影响区-40℃冲击吸收功的平均值为45 J和44 J,低于试验1,按标准换算为标准试样冲击功为90 J和88 J,远高于ASTM A923 B规定的母材最小冲击功54 J,侧向膨胀量远高于标准规定的0.38 mm。如此,三种工艺制备的焊接接头均具有较高冲击韧性,由于自动GTAW填丝盖面或自熔封底的对PAW

焊接接头的再次加热作用,致使PAW焊接接头在自动GTAW填丝盖面或不填丝封底后的焊接接头的热影响区冲击韧性有一定降低。

2.3 腐蚀试验

每块试板制备四个腐蚀试样,分别按ASTM A923 C法和GB/T4334-E法进行接头点腐蚀和晶间腐蚀试验。

1) ASTM A 923 C 法点腐蚀试验

试样表面经过120号砂纸手工湿抛后放入22℃的6% FeCl₃水溶液中试验24 h,清洗干燥后测量其失重,试样试验前尺寸、腐蚀前后重量及腐蚀率等见表7。

表7 氯化铁腐蚀试验结果
Table 7 Ferric Chloride Corrosion test results

试验编号	尺寸(长×宽×厚)/mm	表面积/cm ²	腐蚀前称重/g	腐蚀后称重/g	失重/g	腐蚀率/(mg·dm ⁻² ·d ⁻¹)
试验1	29.78×19.77×3.79	15.53	17.376 3	17.376 2	0.000 1	0.64
	29.65×19.85×3.81	15.54	17.481 8	17.481 7	0.000 1	0.64
试验2	29.90×19.89×3.87	15.75	19.056 2	19.056 1	0.000 1	0.64
	29.99×19.93×3.99	15.94	18.965 4	18.965 2	0.000 2	1.25
试验3	29.57×19.84×3.72	15.41	17.879 9	17.879 7	0.000 2	1.30
	29.47×19.86×3.80	15.45	18.130 9	18.129 4	0.001 5	9.71

2) 晶间腐蚀试验

按GB/T4334-E法分别对试验1~3的晶间腐蚀试样,在标准H₂SO₄-CuSO₄溶液中加热微沸16 h后,取出洗净、干燥,沿熔合线进行弯曲试验,采用10倍放大镜观察弯曲试样外表面,未发现晶间腐蚀引起的开口缺陷。

从试验结果看,三种工艺所完成的焊接接头点腐蚀试验的腐蚀率均能满足10 mg/(dm²·d)的要求,接头均具有良好的耐点腐蚀和晶间腐蚀性能,小孔型PAW接头耐蚀性能优异,在采用自动GTAW填丝盖面后,接头耐点腐蚀性能有所降低,采用自动GTAW自熔封底后点腐蚀性能进一步降低,表明焊接热输入增加将促进耐蚀性能下降^[4]。

2.4 微观组织分析

S22053双相不锈钢母材在固溶处理状态交货,为典型铁素体和奥氏体双相组织,所用母材微观组织如图4所示,试验1~3焊接接头截面宏观形貌及微观组织如图5~7所示,对每个金相试样按ASTM E562金相法测定铁素体含量,测定结果见表8。

从接头截面宏观形貌可以看出,小孔型PAW正面焊缝存在中间高两侧低,且稍低于母材表面,背

面焊缝呈窄而高的突起,焊趾处可能出现未熔合和应力集中,在采用自动GTAW填丝盖面、自熔封底后焊缝外观质量得到显著改善。

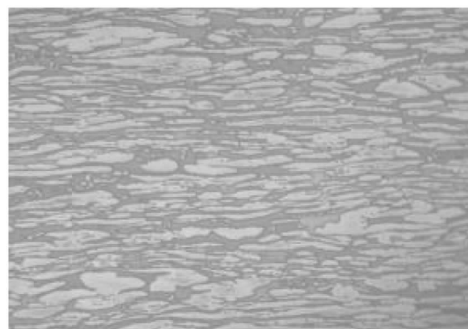


图4 母材微观组织

Fig. 4 Microstructure of base metal

如图5所示,小孔型PAW焊缝由大量块状、带状铁素体和树状、蠕虫状奥氏体组织形成,奥氏体在铁素体晶界呈清晰的树枝状向铁素体晶内生长,蠕虫状奥氏体分布在铁素体晶内;热影响较窄,由小块状铁素体和蠕虫状奥氏体构成,奥氏体稍有减少,铁素体有所增加,奥氏体铁素体组织大小均匀,分布均匀^[7-8]。

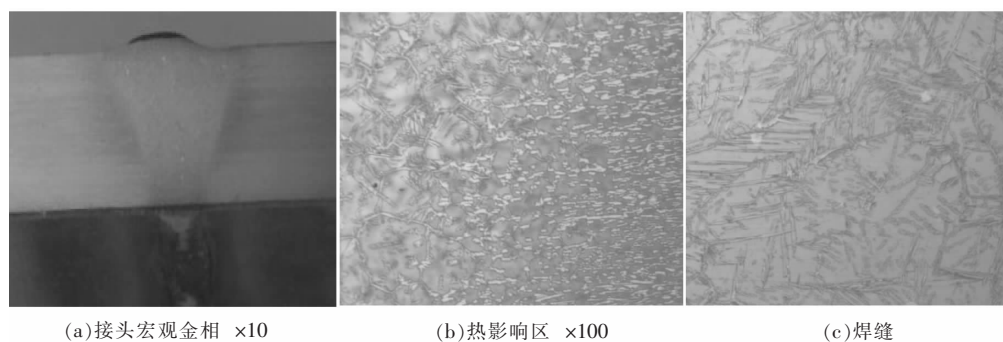


图 5 PAW 接头截面宏观形貌及微观组织

Fig. 5 Macro-structure and micro-structure of PAW weld joint

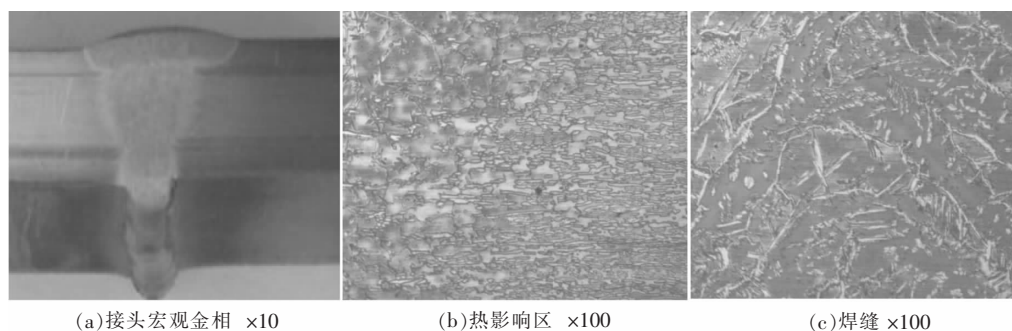


图 6 PAW+自动 GTAW 填丝盖面接头截面宏观形貌及微观组织

Fig. 6 Macro-structure and micro-structure of PAW+auto-GTAW cover pass weld joint

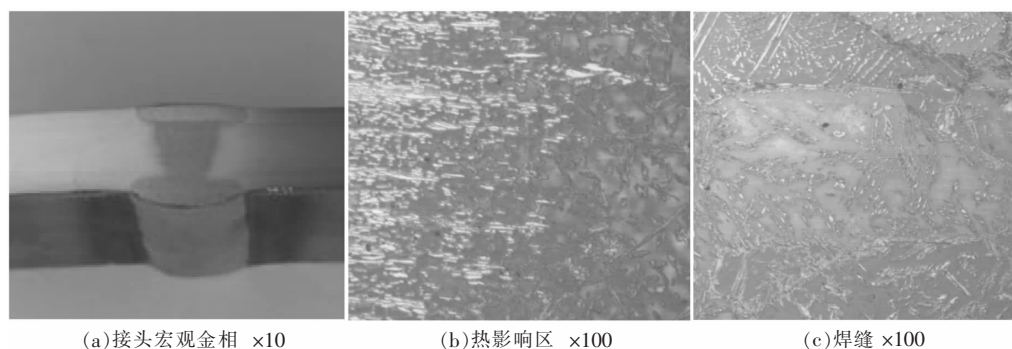


图 7 PAW+自动 GTAW 填丝盖面+自动 GTAW 自熔封底接头截面宏观形貌及微观组织

Fig. 7 Macro-structure and micro-structure of PAW+auto-GTAW cover and root pass weld joint

表 8 各试件焊缝和热影响区铁素体含量
Table 8 Volume fraction ferrite of weld and HAZ for different welding processes

编号	铁素体含量 / %	
	焊缝	热影响区
试验 1	55 ~ 65	50 ~ 60
试验 2	50 ~ 60	35 ~ 45
试验 3	40 ~ 55	35 ~ 50

如图 6 所示,自动 GTAW 填丝盖面后的等离子弧焊缝,焊缝树状奥氏体部分转变为断续针状、蠕虫

状奥氏体,分布在块状、带状铁素体晶界及晶内,数量有所增加,铁素体数有所减少;热影响区奥氏体减少,块状铁素体有明显长大,晶粒大小差异明显。

如图 7 所示,自动 GTAW 自熔封底的等离子弧焊缝块状铁素体增多,晶粒大小差异明显。树状奥氏体消失,奥氏体长大且在铁素体边界呈网状分布,晶粒边界不规则;热影响区组织铁素体增多,铁素体边界的奥氏体块状存在,且不规则,晶粒大小不一。

根据 Fe-Cr-Ni 相图, S22053 双相不锈钢焊缝冷却过程中,首先从液态转变为单一铁素体,在随后冷

却过程中在铁素体晶界发生奥氏体转变^[7];小孔型 PAW 焊缝在快速冷却作用下,形成具有较多块状、带状铁素体和在晶界或晶内分布树状、蠕虫状奥氏体的微观组织。热影响区较窄为小块状铁素体和蠕虫状奥氏体,组织均匀,使接头表现出良好综合性能;在后续自动 GTAW 填丝盖面及自熔封底过程中,电弧再次加热对 PAW 焊缝奥氏体、铁素体形态造成改变,组织比例变化影响较小,对热影响区晶粒大小及分布和相比比例影响较大,这就出现了强度、塑性变化不大,而接头耐蚀性能和热影响区冲击韧性有所下降。

3 结论

通过 S22053 双相不锈钢小孔型 PAW 及自动 GTAW 盖面封底试验过程及结果分析,可以看出:

1) 小孔型 PAW 焊接双相不锈钢薄板,采用便捷成型好的自动 GTAW 填丝盖面或自熔封底可有效降低组对质量要求,更有利于提高组对工作效率,改善焊缝外观质量。

2) 小孔型 PAW 完成的 S22053 焊缝组织为块状、带状铁素体和分布在晶界或晶内的树状、蠕虫状奥氏体,热影响区为小块状铁素体和蠕虫状奥氏体,组织均匀,晶界明晰;自动 GTAW 填丝盖面或自熔封底后,焊缝奥氏体形态和铁素体形态发生变化,奥氏体在铁素体晶界呈网状分布,有魏氏特征,铁素体和奥氏体比例稍有变化,热影响区铁素体、奥氏体块

状分布,组织不均匀。

3) 小孔型 PAW 焊缝及热影响区均具有较好低温冲击韧性、耐腐蚀性能,自动 GTAW 填丝盖面或 GTAW 自熔封底后,由于自动 GTAW 再次加热时热循环对小孔型 PAW 打底接头热影响区的相比比例、组织形态及组织均匀性的影响,造成接头耐蚀性能及热影响区冲击韧性有一定程度降低。

4) 在焊接参数设定合理的情况下,采用小孔型不填丝 PAW、小孔型不填丝 PAW+自动 GTAW 填丝盖面、小孔型不填丝 PAW+自动 GTAW 填丝盖面+自动 GTAW 自熔封底三种焊接工艺制备双相不锈钢薄板焊接接头,可达到与母材等强,具有优异的塑韧性和耐蚀性,满足双相不锈钢在容器制造方面的使用性能要求,不填丝小孔 PAW 及 GTAW 焊接工艺未对接头性能产生明显影响,可用于双相不锈钢薄板的焊接制造。

随着具有优异耐蚀性能和良好加工性能的高强双相不锈钢在各行业应用的迅速扩大,以及小孔型 PAW 焊接工艺和 GTAW 自熔焊接双相不锈钢工艺技术研究的逐步深入和应用走向成熟,小孔型 PAW 作为薄板及打底焊接的焊接方法,将在双相不锈钢薄板焊接方面充分展示其低耗高效特征,促进双相不锈钢材料利用率显著提高,降低生产消耗和投资成本,实现双相不锈钢材料整体应用及加工水平的显著提高,带来极好的社会效益和经济效益。

参考文献

- [1] Lu Shiying. Super stainless steel and high nickel corrosion resistant alloy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012. (陆世英. 超级不锈钢和高镍耐蚀合金 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.)
- [2] Li Chunfan. Stainless steel welding and welding material practical manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015. (李春范. 不锈钢焊接及焊接材料实用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.)
- [3] Shen Yanli, Meng Qingtai. Effect of welding procedure on combination properties of 2205 duplex-stainless steel welding joint [J]. Welding & Joining, 2007, 6: 47-51. (申艳丽, 孟庆泰. 焊接工艺对 2205 双相不锈钢焊接接头综合性能的影响 [J]. 焊接, 2007, 6: 47-51.)
- [4] Welding Society of Chinese Mechanical Engineer Society. Welding Manual Vol. 1 and Vol. 2 [M]. Beijing: China Machine Press, 1993. (中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册 第1卷 第2卷 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.)
- [5] Chen Yuchuan, Li Minxian. Welder manual [M]. The 2nd Edition. Beijing: Machine Industry Press, 2006. (陈裕川, 李敏贤. 焊工手册 [M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2006.)
- [6] Qiu Yanlong, Nie Zhengbin. The quickstarts of plasma arc welding and cutting technique [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technique Press, 2011. (邱言龙, 聂正斌. 等离子弧焊与切割技术快速入门 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2011.)
- [7] Zhang Hanqian. Metallography of steel fusion welding joint [M]. Beijing: Machine Industry Press, 2001. (张汉谦. 钢熔焊接头金属学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.)
- [8] Editorial Committee for Metallographs for Metal Materials. Metallographs for metal materials (Volume 2/2) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006. (《金属材料金相图谱》编辑委员会. 金属材料金相图谱 (下册) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.)

编辑 杨冬梅