

活性剂对 PPCA-TIG 焊接头熔深、组织性能及力学性能的影响

何正刚¹, 黄勇^{1,2,✉}, 徐承浩¹, 高贺文¹, 位亚魁¹, 黄健康^{1,2}

1 兰州理工大学材料科学与工程学院, 兰州 730050

2 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050

钨极惰性气体保护焊(TIG焊)是焊接不锈钢的常用方法之一,但其焊接中厚板时需要开坡口,焊接熔深浅,生产效率低,经济性差。本工作采用新型高效焊接方法——粉末熔池耦合活性TIG焊(PPCA-TIG焊),以1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢为研究对象,通过活性剂配比试验获得最大熔深焊缝,并研究了活性剂对PPCA-TIG焊组织性能及力学性能的影响。结果表明,与传统TIG焊所得接头相比,采用D2活性剂配比焊接时,焊后熔深提高了近2.7倍,电弧发生明显收缩,焊缝组织细化;接头硬度提高9.8%,抗拉强度提高53.7%,接头断裂模式表现为韧性断裂。综上所述,D2活性剂为PPCA-TIG焊接的最优配比,通过此方法不仅改善了焊接质量,而且大幅提高了生产效率。

关键词 1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢 PPCA-TIG 熔深 电弧收缩 活性剂

中图分类号:TG444 **文献标识码**:A

Effect of Active Agent on Depth of Fusion, Microstructure and Mechanical Properties of PPCA-TIG Welded Joints

HE Zhenggang¹, HUANG Yong^{1,2,✉}, XU Chenghao¹, GAO Hewen¹, WEI Yakui¹, HUANG Jiankang^{1,2}

1 School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2 State Key Laboratory of Advanced Processing and Reuse of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

Tungsten inert gas shielded welding (TIG welding) is one of the common methods for welding stainless steel, but it has some disadvantages such as beveling requirement when welding medium-thick plate, shallow weld depth, low productivity and poor economy. This work adopted a new efficient welding method—powder pool coupled active TIG welding (PPCA-TIG welding), taking 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel as the research object, through the active agent ratio test to obtain the maximum depth of fusion weld, and studied the effect of active agent on the microstructure and mechanical properties of PPCA-TIG welding. The results show that, compared with the joints obtained from conventional TIG welding, when using D2 active agent ratio welding, the post-weld depth of fusion is increased by nearly 2.7 times, the arc shrinkage occurs significantly, the weld organization is refined; joint hardness is increased by 9.8%, tensile strength is increased by 53.7%, and the fracture mode of the joint is toughness fracture. In summary, D2 active agent is the optimal ratio for PPCA-TIG welding, this method not only improves the welding quality, but also significantly improves the production efficiency.

Key words 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel, PPCA-TIG, depth of fusion, arc shrinkage, active agent

0 引言

不锈钢因强度高、抗氧化性好、耐腐蚀等优点,被广泛应用于航空航天、汽车和化工等行业^[1-2]。其中,1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢由于其优异的力学性能、良好的耐腐蚀性和焊接性能,在制造业中得到广泛使用^[3]。为了满足实际应用需求,对1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢焊接方法的参数及工艺进行系统性研究具有重要意义。

在焊接技术的发展历程中,传统TIG焊因具有电弧稳定性好及焊接缺陷少等优点而备受关注,但是由于钨电极承载能力有限,传统TIG焊存在焊接板材厚度有限及单道焊缝熔深较浅的问题^[4]。在20世纪60年代乌克兰Paton研究所首次发现活性剂钨极惰性气体保护焊(A-TIG)^[5-6],日本大阪大学^[7]通过添加O₂和CO₂等混合气体来改变熔池Marangoni对流,从而增加焊缝熔深。Tseng等^[8]比较了SiO₂和TiO₂活性剂对A-TIG焊电弧收缩的影响,发现具有更大电负性的SiO₂活性剂在电弧收缩方面表现出更强的性能优势。然而,A-TIG焊接技术仍然存在诸多局限性,包括焊接操作繁琐、难以实现自动化等。为克服这些不足,兰州理工大学黄勇研究

团队^[9-10]提出了PPCA-TIG焊,采用双层气体通道,将活性剂颗粒与钨极保护气体分离开来,从而有效避免了活性剂颗粒对钨极的污染。PPCA-TIG焊不仅具有A-TIG焊增加熔深的优势,还显著提高了生产效率,实现了焊接操作的自动化,并简化了操作流程。

本工作采用10 mm厚的1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢为基材材料,系统研究了PPCA-TIG焊接过程中不同活性剂对焊缝表面形貌、显微组织、物相组成及力学性能的影响,并对其熔深增加机理进行了深入分析,最终确定了PPCA-TIG焊活性剂最优配比。

1 实验

试验板材选用1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢,试样尺寸为100 mm×50 mm×10 mm,该不锈钢化学成分如表1所示。本次试验采用市售的NaF、TiO₂、CaF₂、MnO₂、CuO、SiO₂、Cr₂O₃、B₂O₃和Al₂O₃这九种活性剂进行PPCA-TIG焊接。

在进行焊接试验前,采用砂轮机打磨不锈钢表面直至露出金属光泽,同时将研磨好的活性剂粉末进行烘干,去除其中吸附的水分及结晶水,便于输送。焊接设备采用山东奥太

基金项目:甘肃省科技重大专项(23JRRA765)

✉ hyorhot@lut.edu.cn

表 1 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition(mass fraction,%) of 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Ti	Fe
≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.030	≤0.035	17.00~19.00	8.00~11.00	0.80	余量

WSME-315 III 型焊机,焊接速度通过步进电机驱动的导轨来实现精确控制。PPCA-TIG 焊接试验平台如图 1 所示。分别采用直流 TIG 焊和直流 PPCA-TIG 焊对工件进行熔焊。根据前期的焊接试验,焊接工艺参数如表 2 所示。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

焊接电流 I/A	焊接速度 V/(mm/s)	内层气体 流量 Q/(L/min)	外层气体 流量 Q/(L/min)	弧长 L/mm	钨极 直径 D/mm
220	1.33	12	10	3	3.2

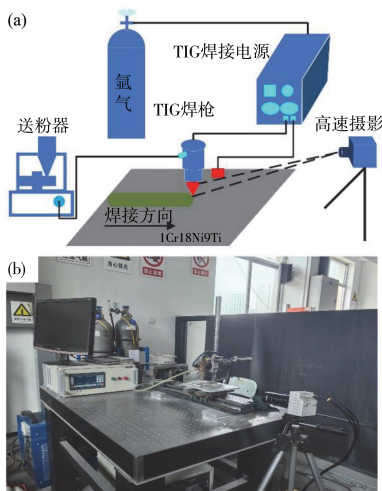


图 1 PPCA-TIG 焊接试验平台:(a) 示意图;(b) 实物图
Fig. 1 PPCA-TIG welding test platform:(a) schematic diagram,(b) physical map

焊接时采用型号为 i-SPEED3 的高速摄影仪对电弧形貌进行观测。焊后采用线切割机对焊接接头沿垂直方向切取金相样,其尺寸为 10 mm×20 mm×10 mm,并用砂纸打磨至试样表面平整、光滑无明显划痕后进行抛光,最后采用王水对试样进行腐蚀。采用 LSM800 型激光共聚焦显微镜对接头微观组织进行观察;采用 SHIMADZU XRD-7000 型 X 射线衍射仪来分析焊缝中的物相组成;使用 AGS-X3000 万能试验机对母材和焊缝进行拉伸试验,取样位置和试样尺寸如图 2 所示。

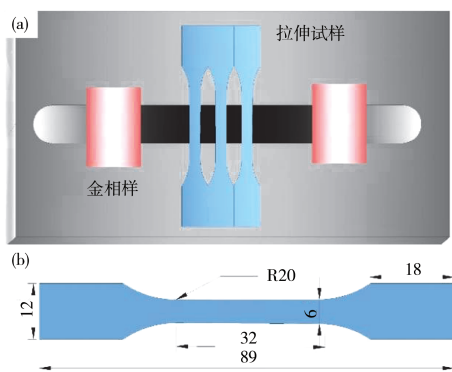


图 2 试样示意图:(a) 取样示意图;(b) 试样尺寸
Fig. 2 Specimen schematic:(a) sampling schematic;(b) specimen size

示;利用场发射 FEG-450 型的电子显微镜(SEM)以背散射电子模式观察拉伸断口形貌,并利用附带的能谱仪(EDS)对拉伸断口部分的元素分布情况进行分析;使用 Wilson-VH1102 维氏硬度计对焊缝试样横截面进行显微硬度测量,检测位置如图 3 所示。

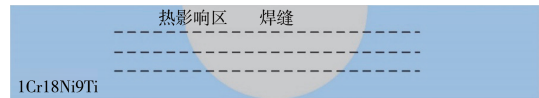


图 3 硬度点位置示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the location of the hardness point

2 结果与分析

2.1 活性剂配比优化

PPCA-TIG 焊通过在焊接区域使用活性剂来提高热输入,从而增加焊缝熔深,有效改善了中厚板的焊接质量,增强焊缝的强度和可靠性。如图 4 所示进行了大量的单组元试验,发现相比于普通 TIG 焊,活性剂的添加均会促进焊缝熔深的增加,同时,大部分活性剂也会使熔宽降低。其中,NaF、SiO₂、Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 四种活性剂对增加焊缝熔深效果明显,且 Al₂O₃ 活性剂增加焊缝熔深效果最为显著,提升了近 2 倍;Cr₂O₃ 次之。从降低熔宽的角度来看,NaF 活性剂降低焊缝熔宽效果最佳。SiO₂ 作为活性剂时焊缝成型较好,焊缝表面平滑,没有明显的凹陷和气孔。因此,选用以上四种活性剂,通过正交试验(L⁹(3⁴))设计了九种多组元活性剂配比试验方案,如表 3 所示。

表 3 多组元活性剂配方正交试验表(单位:g)

Table 3 Orthogonal test table for multi-component active agent formulations (unit:g)

活性剂编号	因素 1 Cr ₂ O ₃	因素 2 SiO ₂	因素 3 Al ₂ O ₃	因素 4 NaF
D1	1	1	1	1
D2	1	2	2	2
D3	1	3	3	3
D4	2	1	2	3
D5	2	2	3	1
D6	2	3	1	2
D7	3	1	3	2
D8	3	2	1	3
D9	3	3	2	1

分别采用 D1、D2、D3、D4、D5、D6、D7、D8 和 D9 九种多组元活性剂进行 PPCA-TIG 焊试验,获得的焊缝宏观形貌如图 5 所示,所有试验组焊缝表面均未出现较大缺陷,熔池宽度基本保持均匀,熔池内部气孔数量减少,这说明多组元活性剂明显改善焊缝质量。其中,D2、D4、D8 和 D9 活性剂焊缝表面无明显凹陷和咬边,熔池内部无气孔夹渣等缺陷,热

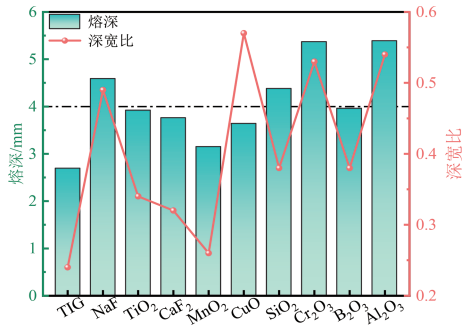


图4 单组元活性剂焊缝熔深及深宽比
Fig. 4 Weld depth and depth to width ratio for single component active flux welds

影响区分明且宽度较窄,焊缝截面呈经典的“U”字形,原因是活性剂提高了电弧在熔池的振荡频率并且有更多的热量进入到熔池内部使焊缝熔深增加。D1和D7活性剂焊缝表面有部分凹陷,截面处有部分咬边,这是由于活性剂颗粒在焊接过程中向电弧外侧运动,电弧高温将部分活性剂颗粒熔化后碰到母材造成的。D3、D5和D6活性剂焊缝表面宽度不均匀,焊缝截面出现宽而窄的形状,这是在焊接过程中电弧不稳定,熔池发生偏移所致。

对多组元活性剂焊接接头熔深及深宽比进行测量统计(见图6)。大部分试验结果显示熔深和熔宽的增减趋势是一致的。其中,D5活性剂焊缝熔深较小,而熔宽最大;D2、

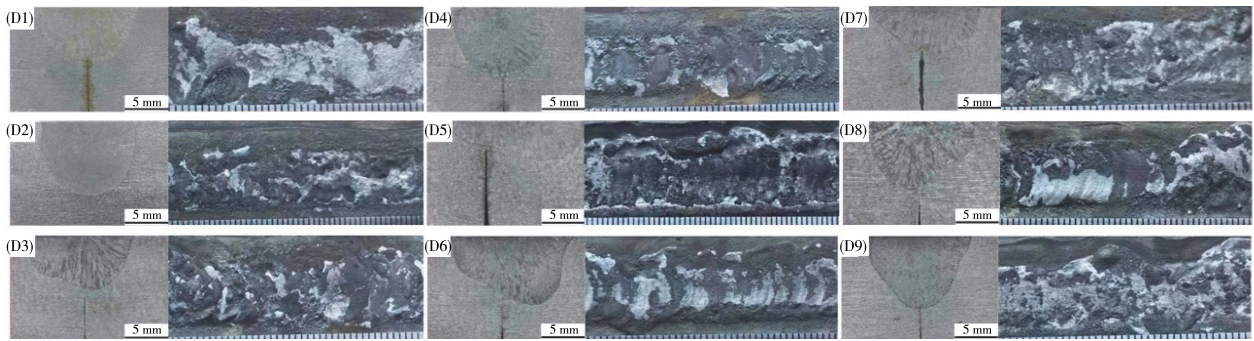


图5 多组元活性剂焊接接头宏观形貌
Fig. 5 Macroscopic morphology of multicomponent active agent welded joints

D4、D8和D9活性剂焊缝熔深较大,均在7 mm左右,深宽比也相应较大,且D2和D9活性剂焊缝熔深平均7.2 mm接近熔透,较传统TIG焊接熔深提高了近2.7倍。综上所述,D2和D9活性剂焊后焊缝表面成型最好,且熔深效果最佳。因此,选取这两组活性剂焊缝进行微观组织及力学性能分析,从而确定最佳活性剂配比。

对电弧收缩作用较为明显^[12-14],电弧收缩使电弧导电通道收窄,电流密度增大,单位面积的电弧热量增加使得垂直于电流方向的洛伦兹力增加,足够的径向分力会把熔池向电弧中轴线推动,熔池开始从四周向中心流动,形成的焊缝变得窄而深。

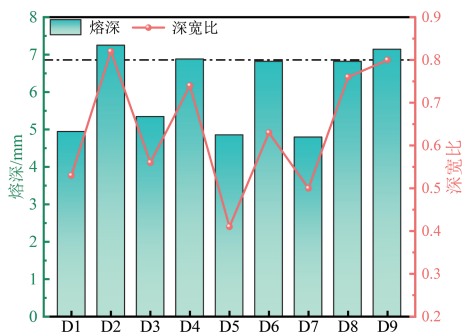


图6 多组元活性剂焊缝熔深及深宽比
Fig. 6 Multi-component active flux weld depth and aspect ratio

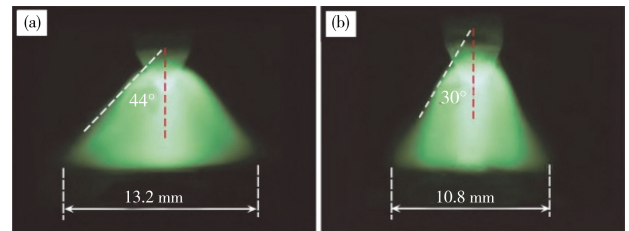


图7 电弧形貌:(a) TIG焊接电弧;(b) A-TIG焊接电弧^[11]
Fig. 7 Arc morphology: (a) TIG welding arc; (b) A-TIG welding arc^[11]

2.2 活性剂对电弧形貌的影响

刘元昊等^[11]分别研究了TIG和A-TIG焊接过程的电弧形貌(见图7),在TIG焊接过程中加入活性剂会使熔深增加,熔宽减小。与A-TIG焊接方法不同,PPCA-TIG焊接过程中活性剂是先进入电弧区域随后过渡到熔池,其对电弧收缩的影响会更大。图8为TIG和PPCA-TIG焊接过程的电弧形貌。从图8中可以明显看到TIG电弧呈钟罩形,弧柱宽大,电弧内层区域较为明亮,外层区域亮度较低;而PPCA-TIG电弧亮度更加饱满,弧柱挺度更高,且电弧内层区域和外层区域都有所收缩。这表明PPCA-TIG焊接过程中活性剂的添加

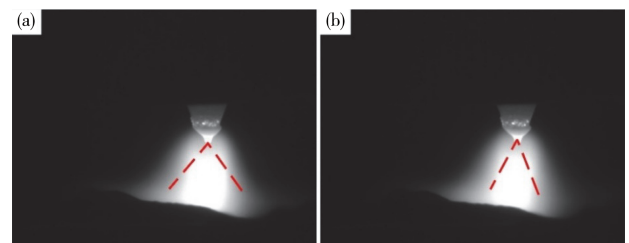


图8 电弧形貌:(a) TIG焊接电弧、(b)PPCA-TIG焊接电弧
Fig. 8 Arc morphology: (a) TIG welding arc, (b)PPCA-TIG welding arc

2.3 活性剂对接头微观组织的影响

图9为TIG和PPCA-TIG焊接接头显微组织。从图9a、c、e中可以看出焊缝中心基体组织为奥氏体,铁素体分布在晶界和枝晶处。采用Image-Pro Plus软件测量接头中心的平均晶粒尺寸,其中TIG焊接接头的平均晶粒尺寸为63.47 μm,D2

活性剂及 D9 活性剂焊接接头的平均晶粒尺寸分别为 33.49、38.93 μm ,说明活性剂的引入使焊接接头晶粒得到细化。这是因为在 TIG 焊接中,热输入较高,冷却速率较慢,从而导致焊缝区形成较粗的晶粒。而 D2 和 D9 多组元活性剂焊缝区晶粒细小且分布均匀是因为加入的活性剂为氧化物,氧元素的加入不仅限制了焊缝晶粒的生长,而且阻碍了位错在焊缝中的运动,起到了晶界强化的作用。

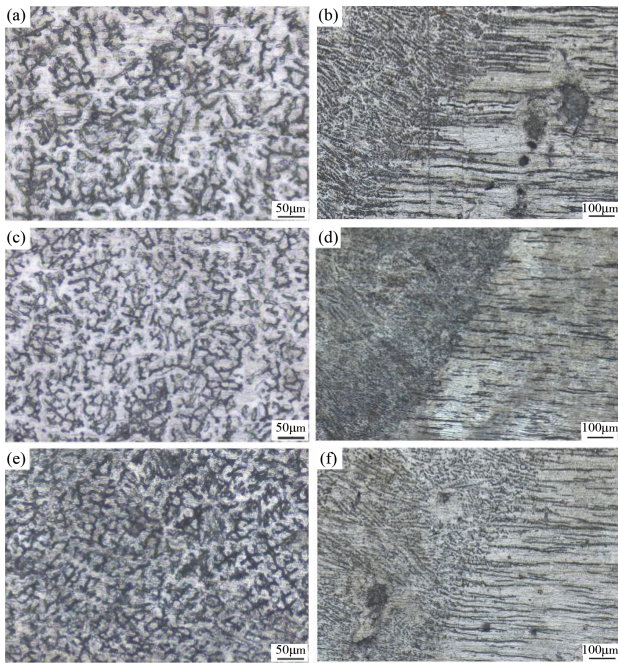


图9 焊缝的显微组织:(a) TIG 接头中心;(b) TIG 热影响区;(c) D2 活性剂接头中心;(d) D2 活性剂热影响区;(e) D9 活性剂接头中心;(f) D9 活性剂热影响区

Fig. 9 Microstructure of the weld:(a) TIG joint center;(b) TIG heat-affected zone;(c) D2 active agent joint center;(d) D2 active agent heat-affected zone;(e) D9 active agent joint center;(f) D9 active agent heat-affected zone

从图 9b、d、f 可以看出,加入活性剂后,热影响区析出了更多的 δ 铁素体在奥氏体基体上弥散分布。 δ 铁素体具有体心立方晶格结构,这种结构可以溶解一定量的合金元素,如铬、钼等。这些合金元素以溶质原子的形式存在于 δ 铁素体晶格中,会引起晶格畸变。而且 δ 铁素体的相界面会阻碍晶界的迁移,使得奥氏体晶粒在长大过程中受到限制,从而细化焊缝金属的晶粒。因此 δ 铁素体的增加可以提高焊接接头的力学性能^[15]。由于 PPCA-TIG 焊接电弧产生的热量主要集中在焊缝中心,熔合线两侧温度梯度较大,因此其焊缝各区域的组织有明显的差异,焊缝区相比热影响区晶粒更为细化。此外,由于 PPCA-TIG 焊接接头热影响区冷却速率比 TIG 焊快,因此 PPCA-TIG 焊所得接头热影响区域相比 TIG 焊显著缩小。

2.4 活性剂对接头物相成分的影响

对 TIG 及 PPCA-TIG 焊接接头进行 X 射线衍射分析,由于 D2 和 D9 活性剂焊接接头物相成分和含量变化不大,因此这里只对 TIG 及 D2 活性剂焊接接头进行对比分析(见图 10),对比后发现,两种焊接接头的图谱均仅有三个明显的强峰,几乎没有杂质峰,焊接接头主要由面心立方奥氏体和

AlCrNi_6Ti 相组成,TIG 焊接接头中出现中间相 Ni-Cr-Mn,而 D2 活性剂焊接接头出现析出相 Cr 和 FeNi。其中 Cr 元素是强烈的铁素体形成元素,它不仅会扩大铁素体相区,而且能够提高铁素体的稳定性,同时合金元素在晶界处的偏聚也会降低晶界的迁移率,使得奥氏体晶粒在长大过程中受到阻碍达到细化晶粒的效果,从而对接头性能起到强化作用。

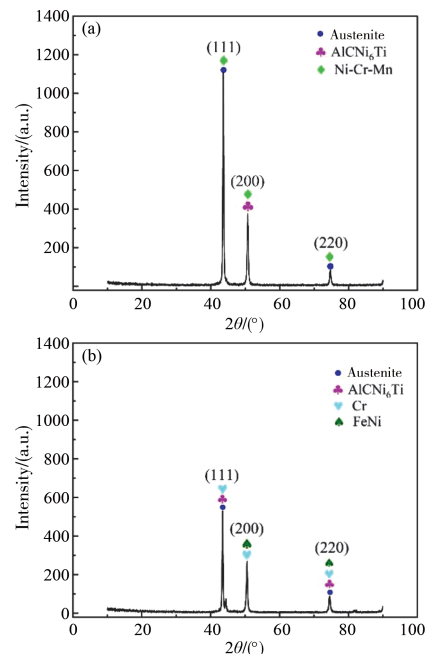


图10 焊缝的 XRD 谱:(a) TIG 焊缝;(b) D2 活性剂焊缝

Fig. 10 XRD patterns of welds:(a) TIG weld;(b) D2 active agent weld

2.5 接头显微硬度分析

图 11 为 TIG 和 PPCA-TIG 焊接接头的显微硬度分布图。整体来看,接头的硬度分布呈现出特有的“W”形态,并且曲线几乎对称,说明焊接时熔池凝固过程中强化元素偏析的现象并不明显。通过对比发现,使用 D2 和 D9 活性剂的焊缝硬度均高于 TIG 焊的焊缝硬度,其中 TIG 焊焊缝硬度为 162HV 左右,D2 活性剂焊缝硬度为 178HV 左右,略高于 D9 活性剂焊缝硬度。根据硬度数据可知,不同试样的硬度分布区间与整体变化趋势相似,只是不同范围的硬度大小有不同程度的变化。因此,整体变化趋势趋于一致。这种差异的主要原因是活性剂的加入增加了焊缝合金元素的种类和含量,析出了更多的铁素体,阻碍晶粒长大,细化了晶粒,从而提高了焊缝硬度。

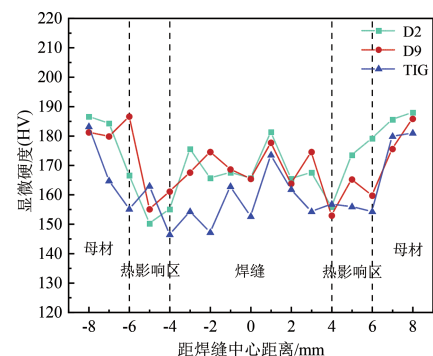


图11 不同试样的显微硬度分布图

Fig. 11 Microhardness distribution of different specimens

2.6 接头拉伸性能分析

图 12 为 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢 TIG 焊接接头和 PPCA-TIG 焊接接头拉伸试验的宏观形貌, 通过观察发现 PPCA-TIG 焊接接头在拉伸过程中断裂位置集中在热影响区。这表明在 PPCA-TIG 焊接过程中, 活性剂的添加使得焊缝和熔合线附近晶粒细化, 但是热影响区在焊接过程中不熔化, 活性剂元素没有进入热影响区, 所以 D2 和 D9 活性剂焊接接头在热影响区断裂。

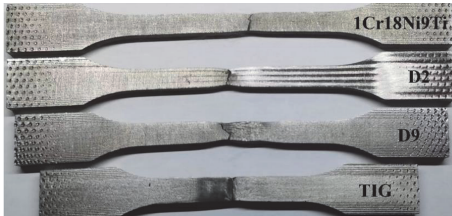


图 12 不同试样的拉伸断口宏观形貌
Fig. 12 Macroscopic morphology of tensile fractures of different specimens

图 13 为 TIG 和 PPCA-TIG 焊接接头的抗拉强度统计, 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢的抗拉强度为 694.6 MPa, D2 和 D9 活性剂焊接接头抗拉强度均超过母材的 95%, 略低于母材, 这是因为活性剂的添加使得接头熔深大幅提高, 铁素体含量增多, 提高了接头强度。TIG 焊接接头的抗拉强度为 438.7 MPa, 其抗拉强度仅为母材的 63.2%, 这是因为 TIG 焊接接头熔深为 2.69 mm, 在接头两端施加拉伸载荷时, 在焊缝中心位置形成应力集中, 导致接头强度急剧下降。

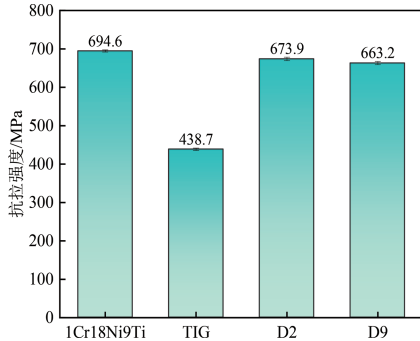


图 13 各试样的抗拉强度
Fig. 13 Tensile strength of different specimens

图 14 为不同试样的拉伸断裂形貌。通过观察断口整体形貌发现, 试样在拉伸断裂过程中经历了显著的塑性变形强化及颈缩阶段, 断口整体较为平滑, 大小和深浅不一的韧窝密集地在断口中均匀分布, 并伴随着白色且明亮的晶界滑移带, 断口均为韧窝和撕裂棱混合型韧性断口^[16], 显示出鲜明的韧性断裂特征。

与 TIG 焊接接头的拉伸断裂形貌相比, D2 和 D9 活性剂焊接接头大的韧窝被小的韧窝所包围, 韧窝分布更加细腻均匀, 并且在韧窝中发现了一些第二相粒子(见图 15)。表 4 为对 D2 活性剂焊接接头的元素分布分析, 结果表明, 这些第二相粒子是由添加的氧元素进入熔池形成的氧化物, 形成夹渣成为起裂源而引发断裂, 导致抗拉强度降低。综合来说, PPCA-TIG 焊接中的氧化物和焊缝颗粒有助于焊缝强化和硬度的提高, 但会造成焊缝冲击韧性的微弱降低。

表 4 P1 与 P2 的 EDS 分析结果(质量分数, %)

元素	O	Al	Si	Cr	Fe	Ni	Ti
P1	28.8	14.2	0.6	27.7	27.2	1.1	0.4
P2	28.5	16.8	1.0	21.1	24.5	3.5	4.6

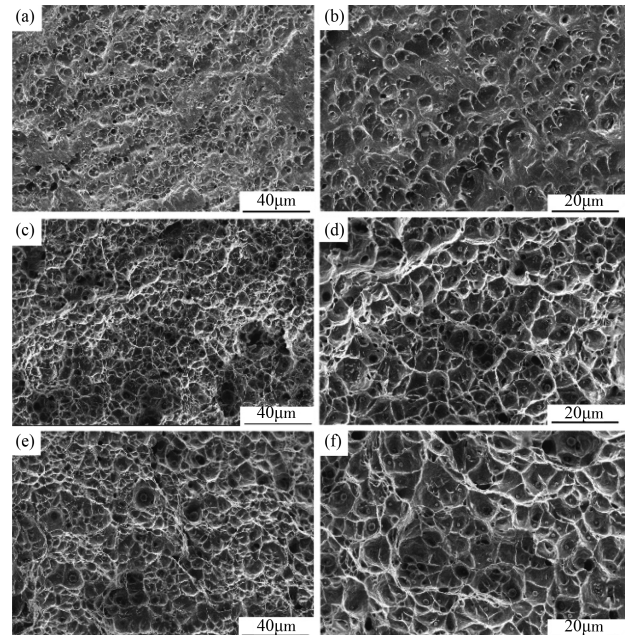


图 14 不同试样的拉伸断裂形貌: (a, b) TIG; (c, d) D2 活性剂; (e, f) D9 活性剂
Fig. 14 Tensile fracture morphology of different specimens: (a, b) TIG; (c, d) D2 active agent; (e, f) D9 active agent

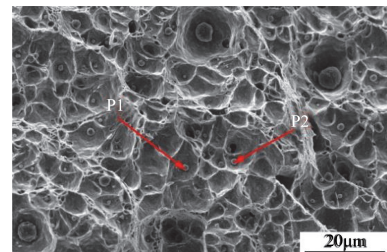


图 15 D2 活性剂断口第二相粒子示意图
Fig. 15 Schematic diagram of the second phase particles in the D2 active agent fracture

3 结论

(1) 在 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢 PPCA-TIG 焊接过程中, 采用 D2 活性剂配比时, 焊接熔深最大为 7.25 mm, 比传统 TIG 焊接熔深提高了近 2.7 倍。熔深增加的主要原因是电弧收缩。

(2) 1Cr21Ni9Ti 奥氏体不锈钢焊接所得焊缝主要由铁素体和奥氏体组织组成。与传统 TIG 焊相比, 采用 PPCA-TIG 焊接所得接头晶粒细小且分布均匀, 晶界面积极增加, 铁素体含量增多, 热影响区明显变窄。

(3) 与传统 TIG 焊接相比, D2 活性剂焊接接头硬度提高 9.8%, 抗拉强度提高 53.7%。综上所述, D2 活性剂为 PPCA-TIG 焊接最优配比。粉末熔池耦合活性 TIG 焊仍具有巨大的发展潜力和工程应用前景, 对国民经济发展和国防建设具有重要意义, 值得广大学者继续深入探索。

参考文献

- 1 An L C, Cao J, Zhang T, et al. *Materials and Corrosion*, 2017, 68 (10), 1116.
- 2 Soltani H M, Tayebi M. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 767, 112.
- 3 Qian L X, Zhao W J. *Coal Mine Machinery*, 2006, 27(4), 637.
钱利霞, 赵万军. *煤矿机械*, 2006, 27(4), 637.
- 4 Liu Z G, Zhou X J, Zhu T T, et al. *Materials Reports*, 2021, 35(S2), 353 (in Chinese).
刘自刚, 周晓静, 朱婷婷, 等. *材料导报*, 2021, 35(S2), 353.
- 5 Huang Y, Zhao W Q, Zhang L Y. *Materials Reports*, 2017, 31(22), 70 (in Chinese).
黄勇, 赵文强, 张利尧. *材料导报*, 2017, 31(22), 70.
- 6 Zeng T, Chao Y J, Zou L J, et al. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2018, 41(4), 82 (in Chinese).
曾涛, 晁耀杰, 邹龙江, 等. *兵器材料科学与工程*, 2018, 41(4), 82.
- 7 Fujii H, Sato T, Lu S, et al. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 495(1-2), 296.
- 8 Tseng K H, Chen K L. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2012, 12(8), 6359.
- 9 Huang Y, Liu R L, Fan D, et al. *Journal of Welding*, 2012, 33(9), 13 (in Chinese).
黄勇, 刘瑞琳, 樊丁, 等. *焊接学报*, 2012, 33(9), 13.
- 10 Huang Y, Wang B, Guo J, et al. *Metals*, 2023, 13(5), 830.
- 11 Liu Y H, Ren C J, Xiang Y J, et al. *Materials Reports*, 2025, 39(1), 254 (in Chinese).
刘元昊, 任昌敬, 向彦君, 等. *材料导报*, 2025, 39(1), 254.
- 12 Simonik A G. *Welding Production*, 1976, 3, 49.
- 13 Simonik A G. *Svarochnoye Proizvodstvo*, 1974, 3, 52.
- 14 Paton B E, Zamkov V N, Prilutsky V P, et al. *Paton Welding Journal C/C of Avtomaticheskaya Svarka*, 2000, 2000(1), 5.
- 15 Zhu W, Wu J X, Shen S H. *Metallurgy and Materials*, 2020, 40(2), 63 (in Chinese).
朱玮, 吴建祥, 沈圣华. *冶金与材料*, 2020, 40(2), 63.
- 16 Dahotre N B, McCay M H, McCay T D, et al. *Journal of Materials Research*, 1991, 6(3), 514.

(责任编辑 翁其能)



何正刚, 兰州理工大学材料科学与工程学院硕士研究生, 在黄勇教授、黄健康教授的指导下进行研究。目前主要研究领域为高效焊接方法。



黄勇, 通信作者, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要从事活性焊接方法及其理论、焊接物理与数值模拟、功能材料连接方法及其理论等领域的研究。