

# 活性剂对 A-TIG 接头熔深、电弧形貌及组织性能的影响

刘元昊<sup>1</sup>, 任昌敬<sup>2</sup>, 向彦君<sup>2</sup>, 岳仕麒<sup>1</sup>, 倪 昱<sup>1,3,✉</sup>, 张鹏贤<sup>1,3</sup>, 黄 勇<sup>1,3</sup>, 黄健康<sup>1,3</sup>

1 兰州理工大学材料科学与工程学院, 兰州 730050

2 西安航天发动机有限公司, 西安 710021

3 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

选用 10 mm 厚 1Cr21Ni5Ti 不锈钢为研究对象, 通过优化活性剂配比及工艺参数获得具有最大熔深的焊缝, 并研究了活性剂对活性剂钨极惰性气体保护焊 (A-TIG) 电弧形貌及接头组织性能的影响。与传统钨极惰性气体保护焊 (TIG) 所得接头相比, A-TIG 所得接头熔深增大了 122%, 电弧发生明显的收缩, 焊缝组织细化, 奥氏体含量增多, 热影响区明显变窄。采用 A-TIG 所得接头抗拉强度高达 702 MPa, 比 TIG 焊接头强度提高了 53.9%, 相当于母材的 96.8%, 其接头断裂在焊缝中心处, 主要是氧化物活性剂的加入而形成夹渣所致, 断裂模式表现为韧性断裂。

关键词 A-TIG 活性剂 熔深 强度 断裂

中图分类号: TG 444 文献标识码: A

## Influence of Activator on the Penetration Depth, Arc Morphology, Microstructure and Properties of A-TIG Joints

LIU Yuanhao<sup>1</sup>, REN Changjing<sup>2</sup>, XIANG Yanjun<sup>2</sup>, YUE Shiqi<sup>1</sup>, NI Yu<sup>1,3,✉</sup>, ZHANG Pengxian<sup>1,3</sup>, HUANG Yong<sup>1,3</sup>, HUANG Jiankang<sup>1,3</sup>

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

2 Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710021, China

3 State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

1 Cr21Ni5Ti stainless steel of 10 mm thick was selected as the research object, and the weld with the maximum penetration depth was obtained by optimizing the activator ratio and process parameters. The effect of activator on the arc morphology, microstructure and properties of A-TIG joints was studied. Compared to the joints obtained by traditional TIG, the joints obtained by A-TIG had a 122% increase in penetration depth, the arc underwent significant contraction, the microstructure of the weld was refined, the content of austenite increased, and the width of heat affected zone significantly narrowed. The tensile strength of the joint obtained by A-TIG was as high as 702 MPa, which was 53.9% higher than the strength of the TIG joint, which was equivalent to 96.8% of the base metal. The joint failed in the center of the weld, which was caused by the addition of oxide activator, formed slag inclusions, and the fracture mode was ductile fracture.

Key words A-TIG, activator, penetration depth, strength, fracture

## 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、汽车和化工行业<sup>[1-2]</sup>。为满足多样化的应用需求, 不锈钢的连接是非常有必要的。钨极惰性气体保护焊 (TIG) 焊接缺陷少, 电弧稳定, 即使电流小于 10 A 仍能保持稳定燃烧。然而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<sup>[3]</sup>。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), 其主要特征是在施焊板材的表面涂一层很薄的活性剂 (一般为氧化物、氯化物、氟化物以及它们的混合物), 使得电弧收缩和熔池流态改变, 从而有效提高 TIG 焊的熔深<sup>[4-5]</sup>。任泽良等<sup>[6]</sup>对比了 Q345 碳钢 TIG 焊和 A-TIG 焊的焊缝成型以及接头的微观组织和力学性能, 研究表明, 活性剂能有效避免焊缝表面形成咬边、凹陷等缺陷。与未涂覆活性剂的接头相比, 涂覆有  $C2(2B_2O_3 + 35SiO_2 + 8CuO + 8NiO + 8MnO + 26TiO_2 + 13Cr_2O_3)$  活性剂的接头中针状铁素体的含量明显升高, 其抗拉强度有小幅提高。

朱嘉文等<sup>[7]</sup>研究了  $SiO_2$ 、 $TiO_2$ 、 $Cr_2O_3$  活性剂对铁素体不锈钢 A-TIG 接头显微组织和力学性能的影响, 结果表明活性剂的加入能增大焊缝的熔深和深宽比, 减小熔宽。其中, 采用  $SiO_2$  活性剂进行 A-TIG 焊接获得了最佳的焊缝几何形貌。沈向前等<sup>[8]</sup>采用不同配比活性剂 ( $x\%SiO_2$ 、 $y\%TiO_2$ ) 对 0Cr19Ni9 不锈钢进行 A-TIG 焊, 研究发现, 二元活性剂  $SiO_2$  与  $TiO_2$  之间存在协同效应, 使焊缝熔深增加更为明显。A-TIG 的焊缝中铁素体含量增多, 并且铁素体及奥氏体相均变得更细小。综上所述, 虽然有很多学者已经对不锈钢 A-TIG 焊的活性剂及组织性能进行了大量研究<sup>[9-10]</sup>, 但对 10 mm 及以上厚度的 1Cr21Ni5Ti 双相不锈钢 A-TIG 焊接的研究尚未报道。

本工作采用 10 mm 的双相不锈钢为基体材料, 通过优化活性剂配比及工艺参数获得具有最大熔深的 A-TIG 焊接头, 并以常规 TIG 焊接头为参照, 对比分析活性剂的介入对 A-TIG 焊接头熔深、微观组织、力学性能及电弧收缩的影响, 以期进一步完善 A-TIG 焊接方法, 为 A-TIG 焊在厚板金属材料中的应用提供一些理论指导。

基金项目: 甘肃省科技重大专项 (22ZD6GA008)

✉ niyu2008@163.com

23120053-1

DOI: 10.11896/cldb.23120053

1 实验

试验材料选用 1Cr21Ni5Ti 双相不锈钢,试板厚度为 10 mm,其化学成分如表 1 所示。在前期单组元试验阶段,活性剂采用市售的 NiO、SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧化物。

表 1 1Cr21Ni5Ti 双相不锈钢的化学成分(质量分数,%)  
Table 1 Chemical composition (mass fraction,%) of 1Cr21Ni5Ti duplex stainless steel

| C    | Si   | Mn   | P    | S    | Cr   | Ni  | Ti   | Fe |
|------|------|------|------|------|------|-----|------|----|
| 0.12 | 0.75 | 0.70 | 0.03 | 0.02 | 21.8 | 5.2 | 0.42 | 余量 |

焊前采用磨光机对工件表面进行打磨,以去除氧化物和毛刺。将丙酮与活性剂粉末按质量比 1:1 调配成糊状物,并用毛刷将糊状活性剂涂覆在对接线两侧,涂覆宽度约为 20 mm,涂覆长度约为 100 mm,涂覆量约为 0.2 mg/mm<sup>2</sup>,待活性剂涂覆层干燥之后进行焊接。焊接设备采用山东奥太 WSME-315 III 型焊机。通过步进电机驱动的导轨来实现焊接速度的精确控制。分别采用直流 TIG 焊和直流 A-TIG 焊对工件进行熔焊,钨极直径为 3.2 mm。在活性剂配比优化试验阶段,工艺参数为焊接电流 200 A、焊接速度 80 mm/min、氩气流量 15 L/min、弧长 3.2 mm。在工艺参数优化试验阶段,焊接电流为 245~275 A,焊接速度为 70~90 mm/min。

为了观察接头熔深及焊缝的组织,焊后采用线切割机切取金相试样,沿着焊缝长度为 15 mm,垂直于焊缝长度为 20 mm。将切取的金相试样依次采用 100#、400#、800#、1000#、1500#、2000#、3000# 的砂纸打磨,待试样表面无明显划痕后,采用颗粒度为 2.5 μm 的金刚石抛光剂进行抛光,最后采用王水对试样进行腐蚀。采用 LSM 800 型激光共聚焦显微镜观察接头熔深及组织变化,熔深测量时取接头熔深最大处。采用单反相机(D810)对焊接过程中的电弧形貌进行采集,为了避免电弧弧光的影响,拍摄时采用的镜头由单焦点镜头、减光片和窄带滤光片组成。ISO 灵敏度设置为 100,光圈值设置为 f/32,曝光时间设置为 1/1 000 s,拍摄速度设置为 50 fps。拉伸试样采用 GB/T228.1-2010 中的方法进行加工,对同一焊接参数下的板材取三个拉伸试样,并以三个拉伸试样测量的平均值表示接头拉伸性能,拉伸速率为 1 mm/min,拉伸试样尺寸如图 1 所示。断口形貌采用 Quant FEG450 型热场发射式扫描电镜进行观察,并借助能谱仪(EDS)对断口内部元素残留进行分析。

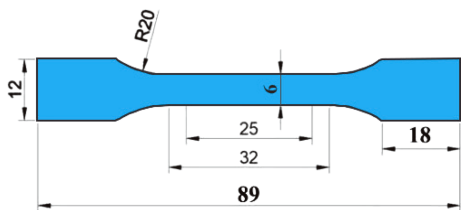


图 1 拉伸试样(单位:mm)  
Fig.1 Tensile test specimen(unit:mm)

2 结果与分析

2.1 活性剂配比优化

通过前期进行的大量单组元活性剂试验发现, NiO、

SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 五种氧化物活性剂对增加焊缝熔深的效果较为明显。但 SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub> 及 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活性剂焊后焊缝表面黑色熔渣较多,表面成型较差, NiO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 两种活性剂焊后焊缝熔宽增大较多。因此,将以上五种活性剂采用不同的配比进行混合,选择 UM<sub>12</sub><sup>\*</sup>(12<sup>5</sup>) 均匀设计表进行配方试验,全部均匀设计表包含 12 组数据,仅选取 6 组代表性数据进行对比分析,以获得专属 1Cr21Ni5Ti 双相不锈钢的最优活性剂配比,具体活性剂配比如表 2 所示。

表 2 活性剂配比成分(质量分数,%)  
Table 2 The proportion and component (mass fraction,%) of the activators

| 活性剂 | NiO | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|-----|-----|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| C1  | 18  | 6                | 12               | 24                             | 40                             |
| C2  | 11  | 10               | 2                | 68                             | 9                              |
| C3  | 8   | 46               | 17               | 2                              | 27                             |
| C4  | 6   | 14               | 42               | 8                              | 30                             |
| C5  | 3   | 63               | 4                | 16                             | 14                             |
| C6  | 1   | 18               | 18               | 39                             | 11                             |

分别采用 C1、C2、C3、C4、C5 及 C6 六种活性剂进行试验,获得的焊缝横截面如图 2 所示。采用 C1 及 C4 活性剂焊接所得接头熔深较浅,熔宽较大,这是活性剂配比中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 过量造成的。采用 C2 和 C6 活性剂焊接所得接头熔宽也较大,这是活性剂配比中 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 过量造成的。采用 C3 和 C5 活性剂焊接所得接头熔深较大,主要归因于 SiO<sub>2</sub> 配比较多,但由于 C3 活性剂 TiO<sub>2</sub> 添加较多,熔池发生偏移。将接头熔深测量数据汇总,如图 3 所示。C2、C3、C5 及 C6 所得焊缝熔深达到 6 mm 以上, C5 活性剂所得接头熔深最大,为 6.5 mm,结合图 2e 可以看出, C5 活性剂所得接头不仅熔深最大而且熔宽最小。

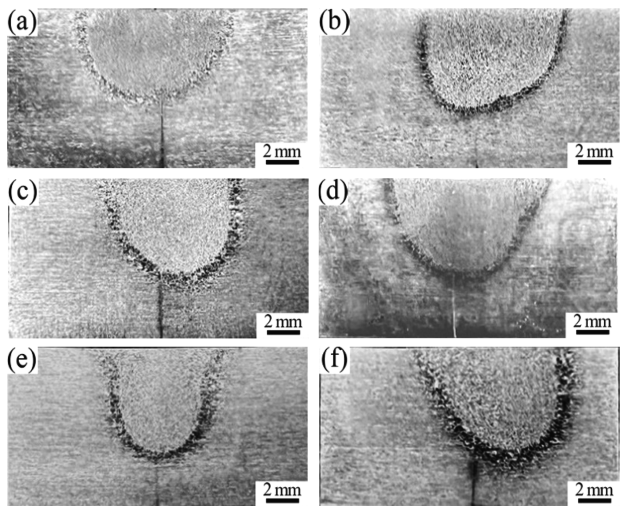


图 2 接头横截面形貌:(a) C1,(b) C2,(c) C3,(d) C4,(e) C5,(f) C6  
Fig.2 Cross section of the joints:(a) C1,(b) C2,(c) C3,(d) C4,(e) C5,(f) C6

2.2 工艺参数优化

本试验采用步进电机驱动的导轨来实现焊接速度的精确控制,弧长固定为 3.2 mm。因此,焊接电流及焊接速度是决定焊缝熔深的两个重要参数。为了更精确地优化工艺参数以获得最大熔深的焊缝,采用 C5 活性剂进行 A-TIG 焊接。



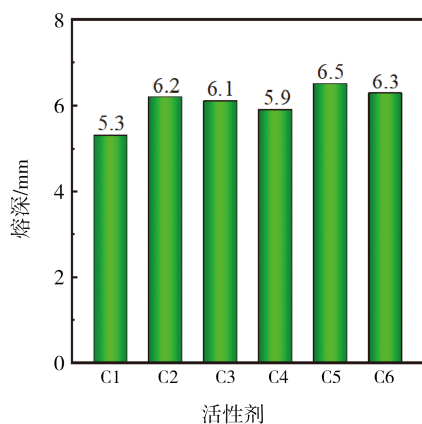


图3 不同活性剂下接头熔深

Fig. 3 The joint penetration depth under different activator

在前期进行大量试验,最终确定焊接电流为 245~275 A,焊接速度为 70~90 mm/min。为了明晰焊接电流与焊接速度对焊缝熔深的交互作用,采用响应面法进行统计,结果如图 4 所示。在焊接速度一定时,随着焊接电流从 245 A 增大到 275 A,焊缝熔深先增大后减小。在焊接电流一定时,随着焊接速度从 70 mm/min 增大到 90 mm/min,焊缝熔深也先增大后减小。经过焊接参数优化的所有焊缝的熔深均达到 6 mm 以上。此外,采用 C5 活性剂在焊接电流为 260 A、焊接速度为 80 mm/min 的条件下焊接所得焊缝熔深最大(8.2 mm)。

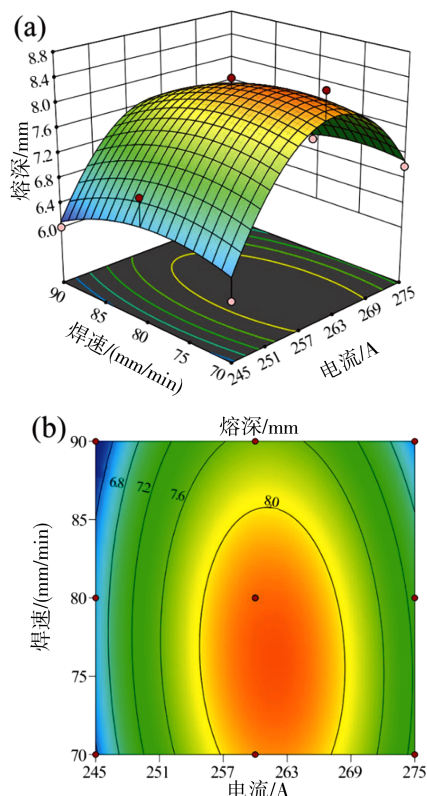


图4 不同工艺参数下接头熔深统计:(a)响应面,(b)等高线(电子版为彩图)

Fig. 4 Statistics of the penetration depth under different parameters:(a) response surface, (b) contour line

### 2.3 活性剂对接头熔深的影响

图 5 为分别采用 TIG 和 A-TIG 焊接所得接头熔深。TIG 焊所采用的焊接电流为 200 A,焊接速度为 80 mm/min,弧长

为 3.2 mm。A-TIG 焊采用优化后的工艺参数进行试验,其焊接电流为 260 A,焊接速度为 80 mm/min,弧长为 3.2 mm。采用 TIG 焊接所得接头熔深为 3.7 mm,仅为板厚的 37%,焊缝形貌为半椭圆形。采用 A-TIG 焊接所得接头熔深高达 8.2 mm,呈现出典型的“V”型。相比 TIG 焊,活性剂添加使得接头熔深增大了 122%。此外,采用 A-TIG 焊接所得接头熔宽明显小于 TIG 焊接所得接头。显然,活性剂配比优化及工艺参数优化对 A-TIG 焊增加熔深作用显著。这主要有两点原因:一是活性剂的添加导致电弧收缩,二是熔池表面张力温度梯度的变化。

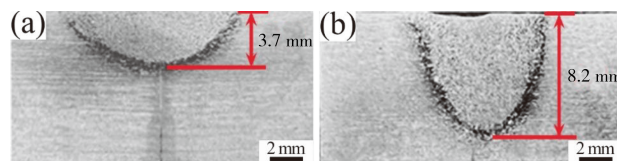


图5 接头熔深:(a) TIG,(b) A-TIG

Fig. 5 Penetration depth of the joints:(a) TIG, (b) A-TIG

### 2.4 活性剂对接头微观组织的影响

图 6 为分别采用 TIG 和 A-TIG 焊接所得接头的显微组织。图 6a、b 为焊接接头焊缝中心的显微组织,焊缝中心组织主要由铁素体和奥氏体组成,柱状晶体沿散热方向向熔池中心生长。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,而且可以明显看到黑色奥氏体的含量较少。在 A-TIG 焊接下,焊缝区的晶粒细小且分布均匀,此外,可以明显看到黑色奥氏体含量增多。这是由于加入的活性剂均为氧化物,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,导致晶粒细化。

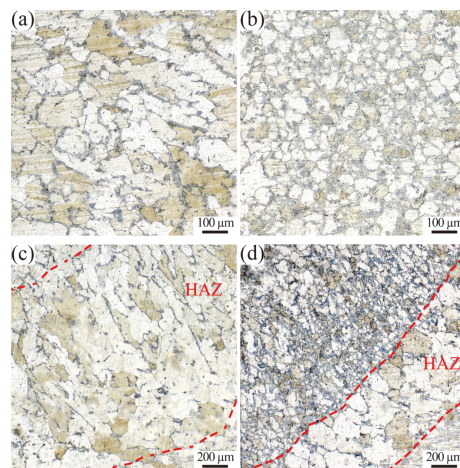


图6 接头微观组织:(a) TIG 焊缝,(b) A-TIG 焊缝,(c) TIG 热影响区,(d) A-TIG 热影响区

Fig. 6 Microstructure of the joint:(a) weld of TIG, (b) weld of A-TIG, (c) heat affected zone of TIG, (d) heat affected zone of A-TIG

图 6c、d 为焊接接头热影响区 (Heat affected zone, HAZ) 的显微组织。与焊缝中心相比,接头热影响区的温度梯度较大,奥氏体的含量明显减少,以垂直于熔合线生长的柱状晶为主。TIG 焊接接头热影响区分布大量长片状铁素体,相比其焊缝区组织略微粗大。A-TIG 焊接电弧产生的热量主要影响焊缝中心,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,热影响区相比焊缝区晶粒更为粗大,奥

氏体含量明显减少。此外,A-TIG 焊比 TIG 焊接头热影响区冷却速率更快,导致 A-TIG 焊比 TIG 焊所得接头热影响区域显著缩小。

2.5 活性剂对电弧形貌的影响

图 7 为分别采用 TIG 和 A-TIG 焊接过程电弧形貌。采用 TIG 焊接所得电弧锥角为  $44^{\circ}$ ,电弧底端面直径为 13.2 mm。采用 A-TIG 焊接所得电弧锥角为  $30^{\circ}$ ,电弧底端面直径为 10.8 mm。这表明活性剂的添加对 TIG 焊接过程电弧收缩作用较为明显,电弧收缩使电弧导电区域面积减小,电流密度增大,单位面积的电弧热量增加使熔深增加,熔宽减小。活性剂引起电弧收缩的原因主要有三点:其一,本试验采用的活性剂为氧化物,导电能力很差,当工件表面涂覆活性剂进行焊接时,由于阳极斑点总会选择活性剂较少的区域以保证电弧的稳定燃烧,此时形成的阳极斑点减小,从而引起电弧收缩<sup>[11]</sup>。其二,在焊接过程中,涂覆在母材表面的活性剂在电弧热作用下以原子态形式包围在电弧周围,蒸发的活性剂原子捕捉电弧周围的电子形成负离子团,与电子相比,负离子团的质量很大、导电能力很差,使得弧柱区导电能力减弱,引起电弧收缩<sup>[12]</sup>。其三,活性剂在电弧热作用下发生热解离,而热解离过程为吸热反应,根据最小电压原理,为了防止电弧热量的散失,电弧会自动发生收缩<sup>[13]</sup>。

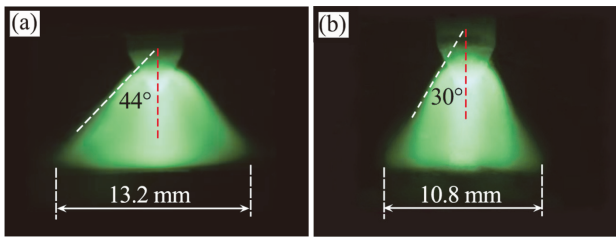


图 7 电弧形貌:(a) TIG,(b) A-TIG  
Fig. 7 Arc morphology:(a) TIG,(b) A-TIG

2.6 活性剂对熔池表面张力梯度的影响

图 8 为熔池表面张力梯度与熔深的关系。图 8a 左侧部分为未涂覆活性剂的常规 TIG 焊所得熔深,右侧部分为涂覆活性剂的 A-TIG 焊所得熔深。在常规 TIG 焊中,由于熔池表面未涂覆活性元素,随着熔池表面温度从熔池边缘的 B 点到熔池中心的 A 点逐渐升高,熔池表面张力逐渐减小。表面张力温度梯度系数为负值,即  $\partial\gamma/\partial T < 0$ ,从而形成从熔池中心 A 点到熔池边缘 B 点的马兰戈尼对流,如图 8b 中 TIG 焊张力方向所示,因此常规 TIG 焊所得接头熔深较浅。当采用涂覆活性剂的 A-TIG 焊接时,随着熔池表面温度从熔池边缘的 C

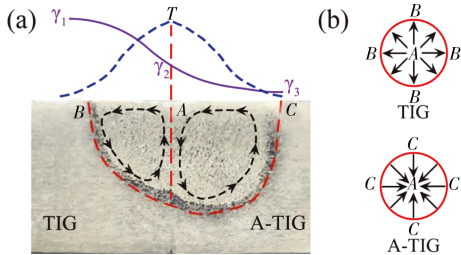


图 8 熔池表面张力梯度与熔深的关系:(a) 对流运动,(b) 熔池表面张力  
Fig. 8 Relationship between surface tension gradient and penetration depth:  
(a) convective motion,(b) surface tension

点到熔池中心的 A 点逐渐升高,熔池表面张力逐渐增大。表面张力温度梯度系数为正值,即  $\partial\gamma/\partial T > 0$ ,从而形成从熔池边缘 C 点到熔池中心 A 点的马兰戈尼对流,如图 8b 中 A-TIG 焊张力方向所示,因此采用涂覆活性剂的 A-TIG 焊接所得接头熔深较深。

2.7 接头拉伸性能

图 9 为分别采用 TIG 和 A-TIG 焊接所得接头拉伸强度柱状图。各接头的测量数据均是在打磨清理余高后测得。从图 9 可以看出,1Cr21Ni5Ti 不锈钢的抗拉强度为 725 MPa,屈服强度为 503 MPa。采用 TIG 焊接所得接头抗拉强度为 456 MPa,屈服强度为 314 MPa,其抗拉强度仅为母材的 62.9%。这是因为采用 TIG 焊接所得接头熔深为 3.7 mm,仅为板厚的 37%,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。采用 A-TIG 焊接所得接头抗拉强度为 702 MPa,屈服强度为 451 MPa,其抗拉强度比 TIG 焊接所得接头抗拉强度提高了 53.9%。这两点原因:一是活性剂的添加使得接头熔深大幅提升,接头承载能力大幅提高;二是活性剂的加入导致奥氏体含量增多,提高了接头强度。A-TIG 焊接所得接头抗拉强度达到母材的 96.8%。焊缝中氧元素的增加是导致 A-TIG 接头的强度低于母材的重要原因<sup>[14]</sup>。一方面,氧元素进入熔池形成氧化物,造成焊缝夹渣;另一方面,氧原子在焊缝中引起晶格畸变,从而导致焊缝力学性能下降。

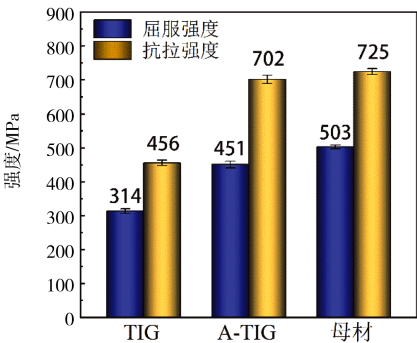


图 9 接头拉伸性能  
Fig. 9 Tensile properties of the joints

2.8 接头断裂行为

图 10 为采用 TIG 和 A-TIG 焊接所得接头的断口形貌。如图 10a 所示,采用 TIG 焊接所得接头断口呈现两层区域,上部断口为焊缝区域,而下部为两板的对接面。从上部焊缝的局部放大图可以观察到许多初窝和少许微孔(见图 10b、c)。对图 10c 微孔内部进行元素分析,结果如表 3 所示。O 元素含量仅为 4.1%,这主要是 TIG 焊中未引入氧化物活性剂所致。采用 TIG 焊接时熔深较浅,在施加拉伸载荷时,承载面积较小而导致接头沿着焊缝中心断裂,主要表现为韧性断裂。

表 3 P1 和 P2 点 EDS 测试结果(质量分数,%)  
Table 3 EDS test results (mass fraction, %) of the P1 and P2

| 元素 | O    | Fe   | Cr   | Ti  | Ni  | Si  |
|----|------|------|------|-----|-----|-----|
| P1 | 4.1  | 68.3 | 21.4 | 2.1 | 3.2 | 0.9 |
| P2 | 30.7 | 46.6 | 17.8 | 1.3 | 2.9 | 0.7 |



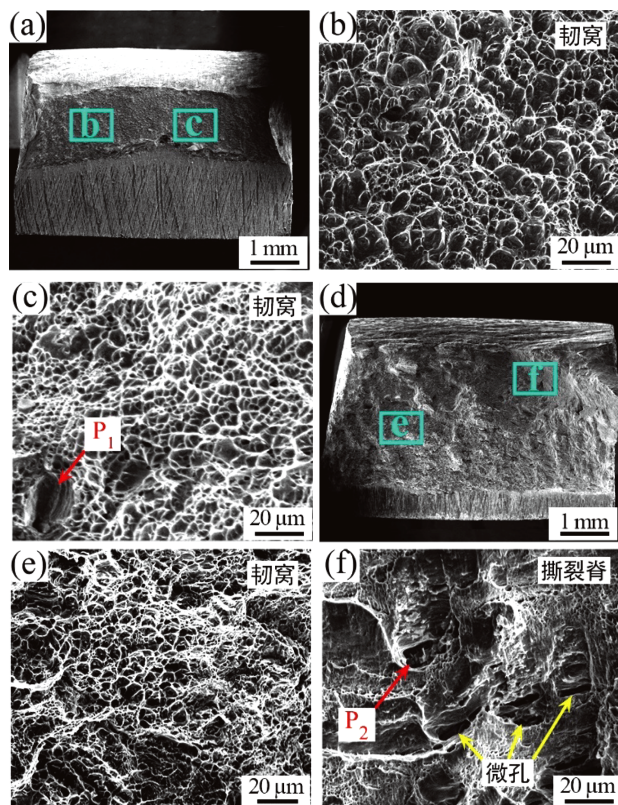


图 10 接头断口形貌:(a—c) TIG, (d—f) A-TIG

Fig. 10 Fracture morphology of the joints:(a—c) TIG, (d—f) A-TIG

图 10d—f 为采用 A-TIG 焊接所得接头的断口形貌,从图中可以看出,A-TIG 焊接所得接头断口也呈现出两层区域,但是由于 A-TIG 焊接接头熔深较大,上部焊缝断裂区域面积较大,下部断裂区域依然为两板的对接面。上部焊缝区域断口也表现出两种不同的形貌。区域 e 断裂面分布有很多小韧窝,断裂面较为平整,如图 10e 所示。区域 f 断裂面不仅有韧窝和撕裂脊,还有一些微孔,如图 10f 所示。其接头整体断裂模式为韧性断裂。通过对微孔内部析出物进行 EDS 分析发现,O 元素含量高达 30.7%,如表 3 所示。这是由于氧化物活性剂的添加导致在焊缝内部形成夹渣,这些夹渣和基体之间应力不平衡导致接头强度低于母材。但是 A-TIG 焊所得接头熔深较大,导致其接头强度远大于 TIG 焊接头。

### 3 结论

(1)对于 10 mm 厚的 1Cr21Ni5Ti 不锈钢,采用 C5 活性剂在焊接电流为 260 A、焊接速度为 80 mm/min 的条件下进行 A-TIG 焊接所得焊缝熔深最大,为 8.2 mm,较常规 TIG 焊提高了 122%。

(2)1Cr21Ni5Ti 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 A-TIG 焊接所得接头组织细化,奥氏体含量增多,热影响区明显变窄。

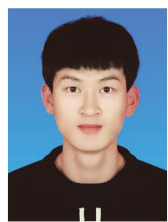
(3)采用 TIG 焊所得接头抗拉强度仅为 456 MPa,而采用 A-TIG 焊接所得接头抗拉强度高达 702 MPa,比 TIG 焊接头强度提高了 53.9%,相当于母材的 96.8%。

(4)采用 TIG 和 A-TIG 焊接所得接头均断裂于焊缝中心,TIG 焊接头断裂主要是熔深较浅而形成应力集中所致,表现为韧性断裂;A-TIG 焊接头断裂主要是氧化物活性剂的引入而形成夹渣所致,也表现为韧性断裂。

### 参考文献

- An L C, Cao J, Zhang T, et al. *Materials and Corrosion*, 2017, 68, 1116.
- Soltani H M, Tayebi M. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 767, 112.
- Liu Z, Zhou X, Zhu 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.
- Huang Y, Zhao W, Zhang L. *Materials Reports*, 2017, 31(22), 70 (in Chinese).  
黄勇, 赵文强, 张利尧. *材料导报*, 2017, 31(22), 70.
- Zheng T, Chao Y, Zou L, 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.
- Ren Z, Yang C, Song Y, et al. *Hot Working Technology*, 2020, 49(23), 12 (in Chinese).  
任泽良, 杨成刚, 宋友民, 等. *热加工工艺*, 2020, 49(23), 12.
- Zhu J, Li J, Yang C, et al. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2022, 14(10), 105 (in Chinese).  
朱嘉文, 李佳, 杨成刚, 等. *精密成形工程*, 2022, 14(10), 105.
- Sheng X, Deng P, Li Y. *Electric Welding Machine*, 2015, 45(12), 32 (in Chinese).  
沈向前, 邓鹏, 李耀辉. *电焊机*, 2015, 45(12), 32.
- Fu Y, Ren Z, Xiao Z, et al. *Welding & Joining*, 2020(4), 56 (in Chinese).  
付彧, 任泽良, 肖中, 等. *焊接*, 2020(4), 56.
- Fan D, Liu Z, Huang Y, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(4), 113 (in Chinese).  
樊丁, 刘自刚, 黄勇, 等. *焊接学报*, 2014, 35(4), 113.
- Tseng K H, Chen K L. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2012, 12(8), 6359.
- Li C, Shi Y, Gu Y, et al. *RSC Advances*, 2017, 7(85), 53941.
- Wu B. The effect of activator on the arc characteristics and weld performance of 309S stainless steel TIG welding. Master's Thesis, Southwest Petroleum University, China, 2016 (in Chinese).  
武斌. 活性剂对 309S 不锈钢 TIG 焊电弧特性及焊缝性能的影响. 硕士学位论文, 西南石油大学, 2016.
- Vidyarthi R S, Kulkarni A, Dwivedi D K. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 695, 249.

(责任编辑 赖 丹)



刘元昊,兰州理工大学材料科学与工程学院硕士研究生,在张鹏贤研究员、倪昱副教授的指导下进行研究。目前主要研究领域为异种金属连接。



倪昱,通信作者,兰州理工大学材料科学与工程学院副教授、博士、硕士研究生导师。目前主要从事异种金属连接、金属材料表面处理等方面的研究工作。