

# 硅对 304 不锈钢 GMAW 高速焊接头组织性能的影响

王子然<sup>1</sup>, 左善超<sup>2,3</sup>, 张善保<sup>1</sup>, 杨义成<sup>1</sup>, 徐亦楠<sup>1</sup>, 周坤<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨, 150028; 2. 机械科学研究总院有限公司, 北京, 100044;  
3. 北京科技大学, 北京, 100083)

**摘要:** 以不锈钢焊丝中 Si 元素含量不同对高速焊后焊缝成形以及接头组织性能为研究目的, 采用 GMAW 焊接工艺方法, 借助扫描电镜、XRD 衍射图谱、拉伸以及微观硬度等力学性能测试作为分析手段, 深入研究 Si 元素在焊缝内部空间分布规律, 及其对焊后成形焊缝组织和力学性能的影响规律。结果表明, 焊丝中存在特定含量的 Si 元素, 不仅能够增加熔池金属流动性, 提高焊接过程稳定性, 改善焊后焊缝成形; 同时焊接速度可以大幅提高至 120 cm/min; 由于 Si 元素的存在, GMAW 高速焊后接头组织主要为奥氏体+ $\delta$  铁素体, 焊缝组织得到优化。XRD 衍射图谱中发现焊后接头组织中存在马氏体和渗碳体, 焊后接头微观硬度有所增加, 拉伸性能基本持平, 且在拉伸断裂前有明显的颈缩, 塑性及抗拉强度良好。

**关键词:** 合金元素 Si; 焊接速度; 组织; 硬度; 抗拉伸性能

**中图分类号:** TG 442 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20190912001

## 0 序言

304 不锈钢属于高镍奥氏体不锈钢, 其具有良好的工艺性能、耐腐蚀性能、力学性能及晶间腐蚀性能等, 广泛应用于换热器、波纹管、压力容器、深海机械以及食品工业、生物医学<sup>[1]</sup>等。文献[2-9]介绍了单激光、激光—TIG/MAG 复合焊、旁路分流 MIG-TIG 双面电弧焊、脉冲 GMAW/CMT 等多种高效焊接工艺方法, 其中采用激光—MAG 电弧复合焊在 3.5 mm 的 304L 母材上堆焊的焊接速度约在 1 m/min 时可以保证一定焊缝熔宽。

Si 作为不锈钢中的重要合金元素可以改善耐腐蚀性能。另一方面, 适度含量的 Si 可以改善熔融金属的流动性, 有利于熔池金属铺展, 但是当含量大于 4%~5% 时, 析出的  $\sigma$  相使母材的脆性大大增加。GMAW(gas metal arc welding) 焊接方法以其设备简单, 柔性度高, 操作方便, 在实际生产中广泛采用, 尤其是工件形状较为复杂、焊接空间较为狭窄、全位置焊接时仍然具有明显优势。不锈钢的 GMAW 焊接熔池金属粘度系数较大, 在中厚板开

坡口要保证焊透的情况下, 焊接速度的提高较为困难, 一般中厚板不锈钢的电弧焊接速度约为 500~600 mm/min。

文中采用不同 Si 含量和异种 308L 焊丝在 304 不锈钢母材进行 GMAW 焊接试验, 分析了特定 Si 元素含量对焊接过程及焊后焊缝成形的影响, 重点研究了其对焊接速度的影响。对焊后焊接接头进行取样, 进行了金相组织、力学性能、XRD 等试验并对结果进行对比分析。

## 1 试验方法

试验母材选用 304 不锈钢, 试板尺寸为 150 mm × 100 mm × 5 mm, 加工 45°V 形坡口不留钝边。焊丝直径为 1.2 mm 的 308L 标准及特种焊丝 (308L-Si), 母材及焊丝化学成分如表 1 所示, 保护气成分为混合气 (95%Ar + 5%CO<sub>2</sub>)。

采用表 1 中 308L 焊丝搭配表 2 中两组参数在母材坡口处施焊; 采用表 1 中 308L-Si 焊丝搭配表 2 中第二组参数在上述坡口处施焊; 对焊接速度及焊缝成形对比分析, 在良好成形焊缝上进行取样, 并对所取试样分别进行金相组织、XRD 衍射图谱、力学性能等试验, 对上述试验结果进行对比分析。

收稿日期: 2019-09-12

基金项目: 国家科技重大专项课题 (2017ZX04012001); 黑龙江省资助项目 (GX18A18); 黑龙江省头雁行动计划-能源装备先进焊接技术创新团队资助。

表 1 母材与焊丝化学成分表 (质量分数, %)  
Table 1 Chemical composition of base metal and wire

材料	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
母材	0.06	1.00	2.00	17~19	8.0~10.5	其余
308L	0.014	0.55	1.91	20.28	9.73	其余
308L-Si	0.014	0.87	1.95	20.04	9.82	其余

表 2 试验工艺参数  
Table 2 Table of test process parameters

组别	焊接电流 <i>I</i> /A	电弧电压 <i>U</i> /V	焊接速度 <i>v</i> /(cm·min <sup>-1</sup> )	弧长修正	电弧挺度	保护气流量 <i>q</i> /(L·min <sup>-1</sup> )
第一组	245	26.7	120	0	1.0	18
第二组	152	20.2	60	0	1.0	15

2 试验结果及分析

2.1 不同 Si 含量及焊接速度焊缝成形对比

图 1 为不同焊丝及焊接速度的焊缝形貌. 308L 焊丝的焊接速度在 60 cm/min 时焊缝成形、背部熔透均良好, 如图 1a 所示. 但在 120 cm/min 时无法形成有效焊缝, 如图 1b 所示. 308L-Si 在该速度下则达到了良好成形, 同时背部熔透均匀平整, 如

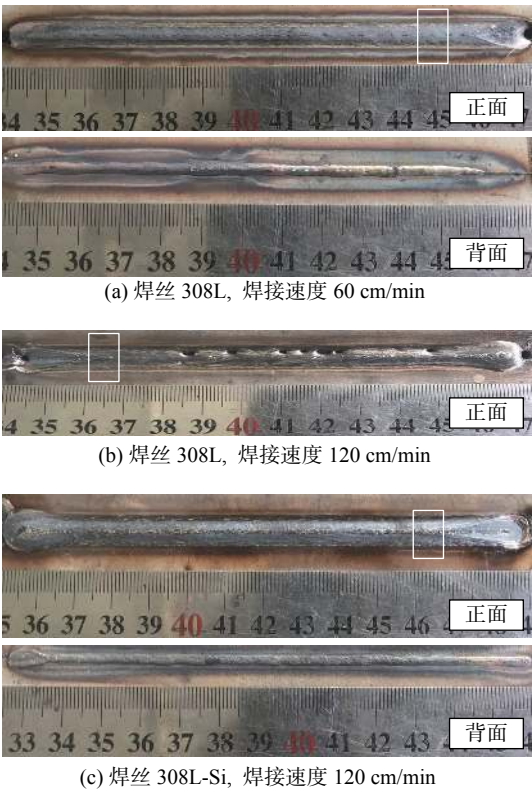


图 1 不同焊丝和焊接速度的焊缝形貌

Fig. 1 Results of different wires and speed. (a) 308L, 60 cm/min; (b) 308L, 120 cm/min; (c) 318L-Si, 120 cm/min

图 1c 所示. 分析认为在相同的工艺参数下, 电弧笼罩区的温度接近, 送丝速度也一致, 因此由熔滴过渡后电弧笼罩区熔融金属向熔池边缘流动的驱动力几乎一致, Si 元素过渡到熔池金属后改善了熔池金属的流动性, 减弱了向熔池两侧铺展的阻力, 因此实现了焊接速度的大幅增加和焊后焊缝的良好成形.

2.2 不同接头形貌与组织对比

2.2.1 接头形貌对比

在图 1a, 1b, 1c 取样, 取样位置如图 1 虚线框所示, 得到的接头形貌如图 2 所示.

上述三种试验条件下, 焊接接头的形貌均呈现上端宽下端窄的丁字形形式. 图 2a 的接头熔合线平滑稳定, 其次是图 2b, 2c. 对图 2b, 2c 进行对比, 可以看出后者的熔合线更为平滑稳定; 结合图 1a, 1c, 后者在 120 cm/min 情况下背部熔透能够保持均匀平整, HAZ 均匀细小, 形成了单面焊双面成形; 前者的背部熔透相对有些波动, 在起弧区附近甚至有一段没有熔透, HAZ 相对较宽且不稳定. 这说明在 120 cm/min 的焊接速度下, 后者依然能保持稳定焊接过程, 其熔池金属在板厚方向上也具有良好的对流换热能力, 随着电弧前进, 熔融金属向根部的流动呈现均匀良好的状态, 有利于微观组织的形核生长, 保证成形焊缝性能.

2.2.2 微观组织对比

取图 2 中 A, B, C, A', B', C' 6 个位置依次进行 500 倍放大, 组织如图 3 所示. 可以看出 A 中, 熔合区以及热影响区组织附近为奥氏体 +  $\delta$  铁素体,  $\delta$  铁素体沿晶分布, 析出层宽度明显大于 A', 少数晶粒中出现奥氏体、 $\delta$  铁素体相间分布; B 处熔合区

以及热影响区组织为奥氏体+少量  $\delta$  铁素体, 沿轧制方向分布, 铁素体析出层宽度明显小于 B'; C 处

熔合区以及热影响区组织为奥氏体+铁素体, 沿晶分布, C' 中存在极少的铁素体。

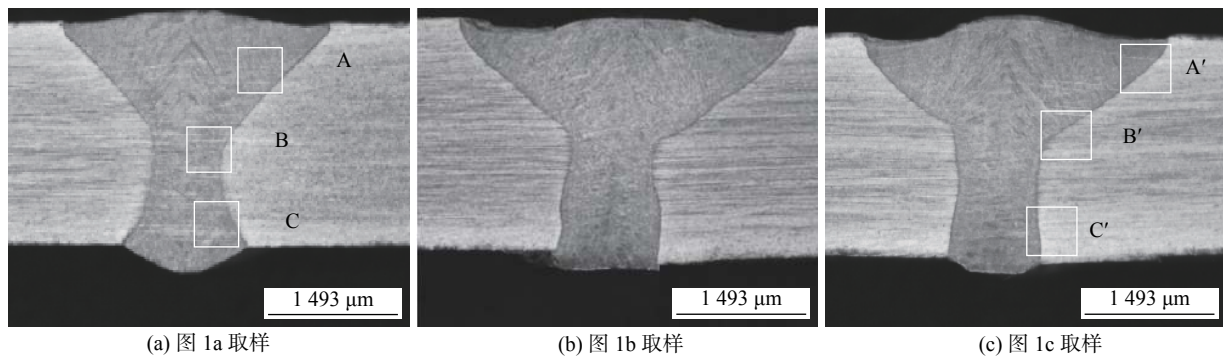
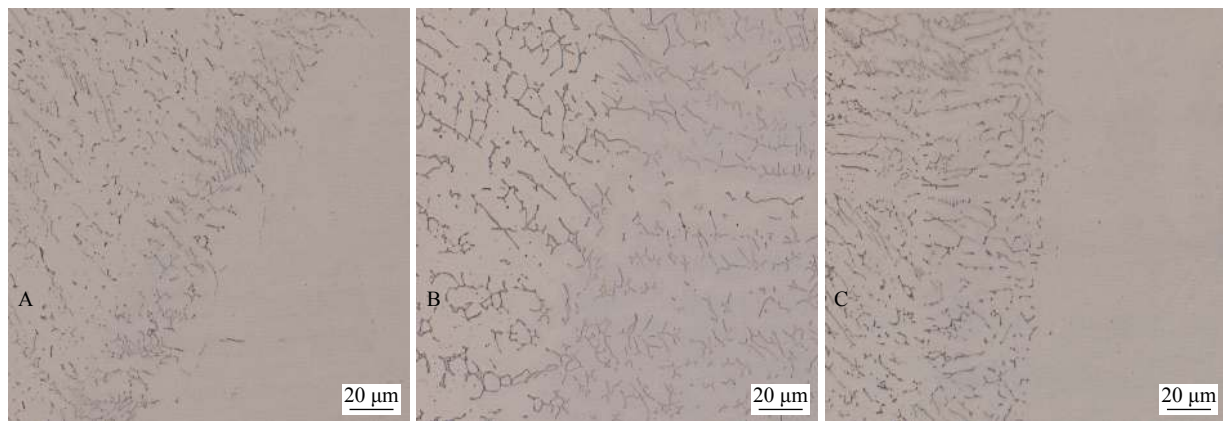
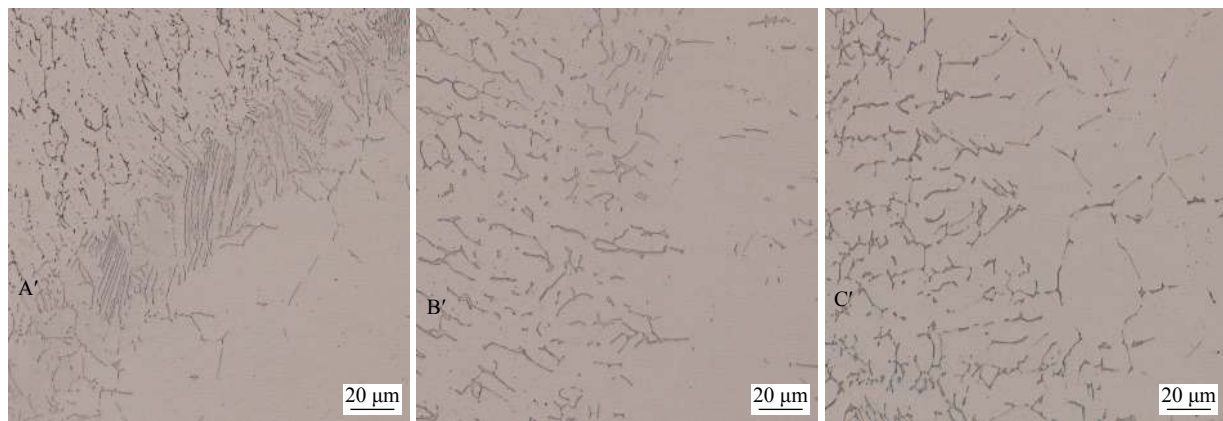


图 2 不同焊缝取样接头形貌

Fig. 2 Cross-section of different weld. (a) Fig.1a sampling; (b) Fig.1b sampling; (c) Fig.1c sampling



(a) 308L, 60 cm/min 接头组织



(b) 308L-Si, 120 cm/min 接头组织

图 3 接头不同部位微观组织

Fig. 3 Microstructure of different parts of joints. (a) 308L, 60 cm/min; (b) 308L-Si, 120 cm/min

为分析不同焊接接头中 Si 元素的走向分布以及两种情况下熔池内部的流动情况, 对两种接头进行点扫描, 每个接头取点位置、Si 元素的原子分数如图 4 所示。

从图 3 和图 4 可以看出, 后者的组织中主要为奥氏体+ $\delta$  铁素体, 对于奥氏体不锈钢,  $\delta$  铁素体可

以阻止奥氏体晶粒长大, 细化凝固亚晶, 打乱枝晶方向性, 进而提高焊缝抗结晶裂纹能力, 此外还能固溶杂质元素, 是一种有益的组织。Si 元素是铁素体化元素, 在图 3b 各个区域附的 Si 元素原子数量水平都高于图 3a, 因此 Si 元素起到了优化焊缝组织的作用。在板厚方向, 两种接头的 Si 元素含量自



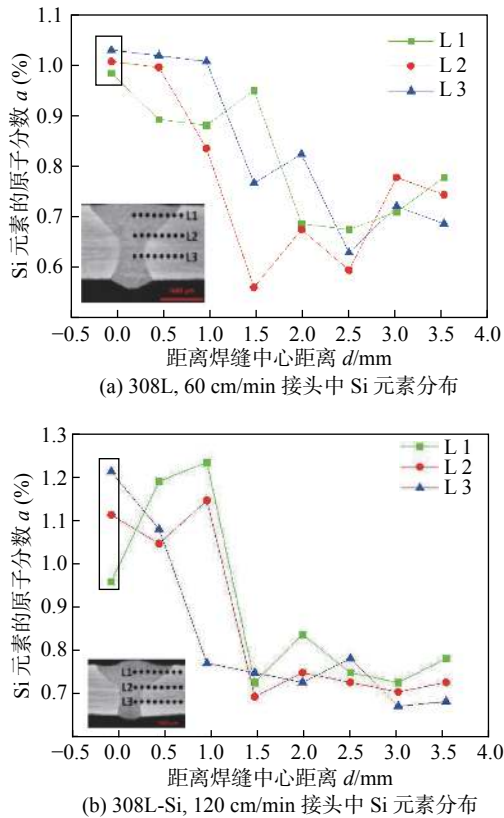


图 4 两种接头 Si 元素分布

Fig. 4 Distribution of Si in different joints. (a) 308L, 60 cm/min; (b) 308L-Si, 120 cm/min

上而下都呈现递增的趋势,在根部达到最高水平,其中后者在高速的前提下 3 个位置 Si 元素原子含量的浓度都处在较高的水平上,说明后者的熔融金属在板厚方向也具有较好的流动性。在点扫描方向上,二者都呈现 Si 元素含量从焊缝中央到熔合区再到 HAZ 的快速下降至相对稳定。后者 L1, L2, L3 3 个方向上 Si 元素过渡一直波动较大,这说明后者熔池内部金属中部 Si 元素含量高区向两侧过渡起初相对剧烈,这是由于浓度梯度较大,之后浓度梯度相对降低,对流换热相对平稳直至凝固,说明熔池金属内部的对流换热过程相对规律,也与图 1 所示的两种的焊缝正面、背部的热影响区呈现的结果相对应;前者则波动较大,从熔合区至 HAZ 一直呈现不稳定性,说明熔池内部对流换热过程相对激烈,尤其是 L3, HAZ 附近也呈现相对不稳定趋势,甚至焊缝背部的 HAZ 范围相对较大, Si 元素含量有所波动,在中段有热量不足以及在息弧区域附近有未熔透,如图 1b。

### 2.3 不同接头力学性能的对比

#### 2.3.1 微观硬度对比

根据图 4 中所示点进行接头硬度测试,每个接

头自焊缝中心经过熔合区、热影响区,分别选取 8 个点,每两个点的距离为 0.5 mm。得到两条硬度分布曲线如图 5 所示。

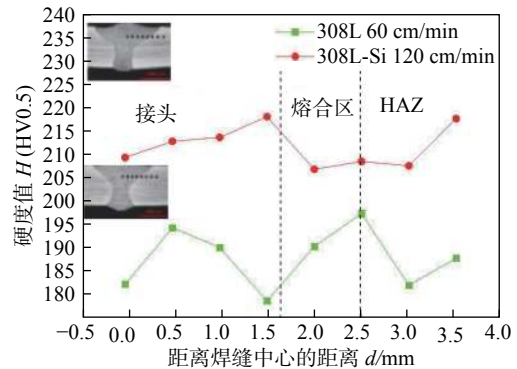


图 5 两种接头截面硬度分布

Fig. 5 Hardness distribution of cross section of joints

从图 5 试验结果可以看出,无论在焊缝区、熔合区、热影响区, 308L-Si 焊丝在 120 cm/min 焊接速度下焊后的接头硬度相对于 308L 焊丝在 60 cm/min 焊接速度下都有所增加,与母材硬度值比较接近。前者硬度值在焊缝区较高,并出现了峰值接近 222.4 HV。在熔合区则有所下降, HAZ 区也有所增加,平均硬度值 212.35 HV;后者在焊缝区的硬度值在焊缝区先增加后减小,在熔合区有所增加,达到峰值 198.8 HV。在 HAZ 区有所降低,平均硬度值 189.75 HV。

二者硬度值峰值、平均值与母材硬度值柱状图如图 6。根据热输入计算公式,即

$$q = \eta UI / v \quad (1)$$

式中:  $q$  为热输入 (J/cm);  $\eta$  为热效率系数 (%);  $U$  为电弧电压 (V);  $I$  为焊接电流 (A);  $v$  为焊接速度 (cm/min)。

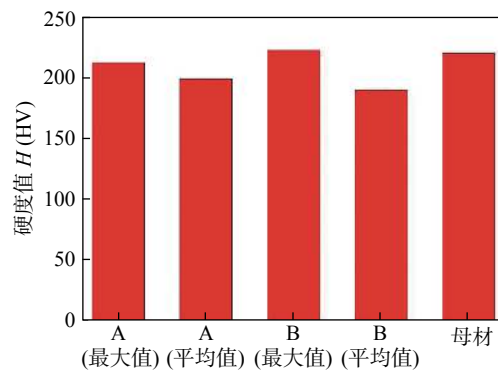


图 6 各项硬度值指标对比

Fig. 6 Comparison of hardness values

前者的热输入为 2 616.6 J/cm, 后者的热输入为 2 456.32 J/cm。分析认为由于焊接热输入较大,

导致了前者层状铁素体析出量少于后者,从而硬度值有所增加。此外,前者整体的 Si 元素水平都要高于后者,且硬度值的变化趋势与 Si 元素的变化趋势一致,均呈现由焊缝、熔合区、HAZ 先有所增加后降低至平稳的一个趋势,说明了 Si 元素的存在一定程度上影响了焊缝的硬度。

通过对二者进行 XRD 物相分析 (图 7),前者的组织中发现了渗碳体和马氏体。钢中马氏体形成的因素主要为温度、形变<sup>[10]</sup>以及某些外因 (如氢致)<sup>[11]</sup>,这是因为焊接速度过快以至于存在较大的过冷度,钢从奥氏体状态快速冷却,在马氏体温度以下形成了马氏体组织。渗碳体和马氏体的存在也增加了焊缝的硬度值。

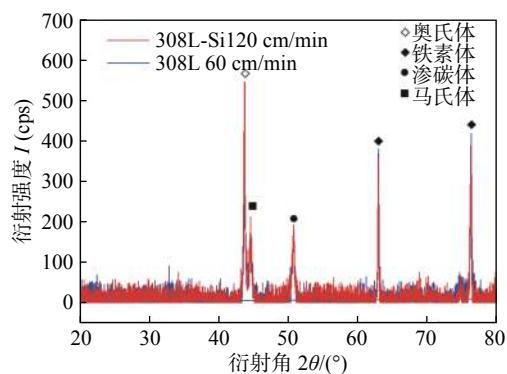


图 7 两种接头 XRD 物相图谱

Fig. 7 XRD phase patterns of the two joints

### 2.3.2 拉伸强度对比

为验证上述两种接头的强度,对两种焊缝分别取样进行拉伸试验,试样形式为非标光滑试样,尺寸如图 8 所示,每个接头取两个试样 (A, B, C, D) 求取平均值。图 9 为两种接头的拉伸曲线,断裂位置如图 10 所示。

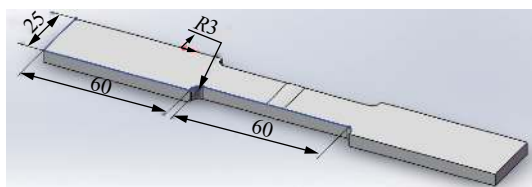


图 8 拉伸试样形式及尺寸 (mm)

Fig. 8 Tensile test specimen form and size

根据上述试验,308L-Si 焊丝在 120 cm/min 焊接速度下 (A, B 两组试验) 的平均抗拉强度为 702 MPa, 308L 焊丝在 60 cm/min 焊接速度下 (C, D 两组试验) 的平均抗拉强度为 700 MPa, 约为母材拉伸强度的 83%~85%。

二者的断裂位置都处在焊缝和熔合区之间的

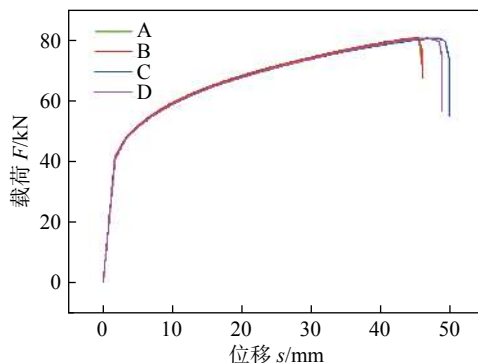


图 9 两种接头的拉伸曲线

Fig. 9 Two kinds of joint stretch curve

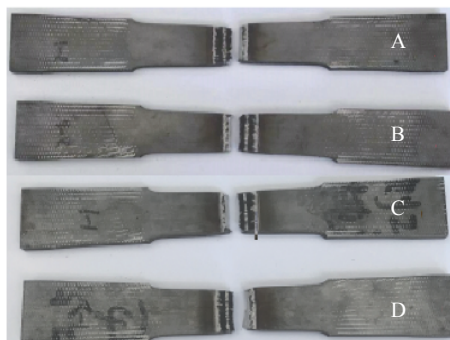


图 10 4 个拉伸试样的断裂位置

Fig. 10 Fracture location of four tensile tests

区域,断口颜色皆灰暗,有剪切型韧性断裂的特征。另外,从图 9 和图 10 结合可以看出,两种试验试件的拉伸位移均较大,后者的位移略大于前者,且在断裂前都有明显的颈缩发生,说明二者的塑性及抗拉强度均较为良好,且十分接近。

## 3 结论

(1) 308L-Si 焊丝可以在 5 mm V 形坡口母材上以 120 cm/min 焊接速度实现良好成形且焊透,选用的工艺参数为焊接电流 245 A;电弧电压 26.7 V;弧长修正 0;电弧挺度 1;保护气流量 18 L/min。相同条件下,308L 无法做到。

(2) 两种焊丝焊缝组织接近为奥氏体 +  $\delta$  铁素体。在高速焊的前提下, Si 元素促进铁素体在奥氏体中形成,改善了组织。在熔池内部横向及纵向都具有相对良好的对流换热,使得焊后正面成形良好,背部熔透均匀。

(3) 308L-Si 焊接接头微观硬度值在各个区域都略高于 308L 焊丝。此外 Si 元素的分布规律与硬度值规律一致。二者焊后焊缝都具有良好的塑性及

抗拉伸性能,其中拉伸性能约占母材的83%~85%。

## 参考文献

- [1] 李红梅,孙大千,王文权,等.奥氏体不锈钢焊丝激光焊接头的组织与力学性能[J].*焊接学报*,2009,30(6):71-74.  
Li Hongmei, Sun Daqian, Wang Wenquan, *et al.* Microstructure and mechanical properties of austenite stainless steel wire joints welded by laser[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(6): 71-74.
- [2] 刘桐,杨立军,邱文聪,等.304不锈钢激光深熔焊元素蒸发及焊缝合金含量变化[J].*焊接学报*,2018,39(2):6-9.  
Liu Tong, Yang Lijun, Qiu Wencong, *et al.* Vaporization and composition change of 304 stainless steel during keyhole mode laser welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(2): 6-9.
- [3] 张林杰,张建勋,曹伟杰,等.工艺参数对304不锈钢脉冲Nd:YAG激光/TIG电弧复合焊焊缝成形的影响[J].*焊接学报*,2011,32(1):33-36.  
Zhang Linjie, Zhang Jianxun, Cao Weijie, *et al.* Effects of welding parameters on welding geometry of pulsed Nd: YAG laser/TIG hybrid welding process of 304 stainless steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(1): 33-36.
- [4] 杨涛,何双,陈勇,等.304L不锈钢激光—脉冲MAG复合焊电弧特性及焊缝成形分析[J].*焊接学报*,2016,37(7):66-69.  
Yang Tao, He Shuang, Chen Yong, *et al.* Arc characteristics and weld forming analysis of 304L stainless steel laser-pulse MAG composite welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(7): 66-69.
- [5] 苗玉刚,韩端峰,吴斌涛,等.不锈钢旁路分流MIG-TIG双面电弧焊工艺特性[J].*焊接学报*,2013,34(12):29-32.  
Miao Yugang, Han Duanfeng, Wu Bintao, *et al.* Characteristics of bypass-current MIG-TIG double-sided welding of stainless steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(12): 29-32.
- [6] Miao Yugang, Ma Zhaowei, Yang Xiaoshan, *et al.* Experimental study on microstructure and mechanical properties of AA6061/Ti-6Al-4V joints made by bypass-current MIG welding-brazing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 260: 104-111.
- [7] 苗玉刚,李春旺,张鹏,等.不锈钢旁路热丝等离子弧增材制造接头特性分析[J].*焊接学报*,2018,39(6):35-39.  
Miao Yugang, Li Chunwang, Zhang Peng, *et al.* Joint characteristic of stainless steel bypass-current wire-heating PAW on additive manufacturing[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(6): 35-39.
- [8] Yang Jingjing, Wang Yun, Li Fangzhi, *et al.* Weldability, microstructure and mechanical properties of laser-welded selective laser 304 stainless steel joints[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35: 1817-1824.
- [9] Paola Luchtenberg, Paulo Tancredo de Campos, Paulo Soares, *et al.* Effect of welding energy on the corrosion and tribological properties of duplex stainless steel weld overlay deposited by GMAW/CMT process[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2019, 375: 688-693.
- [10] 杨建国,陈双建,黄楠,等.304不锈钢形变诱导马氏体相变的影响因素分析[J].*焊接学报*,2012,33(12):89-92.  
Yang Jianguo, Chen Shuangjian, Huang Nan, *et al.* Factors affecting deformation induced martensitic transformation of SUS stainless steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(12): 89-92.
- [11] 李海涛,杨文杰,王军,等.焊接工艺对TP304钢焊缝金属组织及性能的影响[J].*焊接学报*,2012,33(4):89-92.  
Li Haitao, Yang Wenjie, Wang Jun, *et al.* Study of microstructure and properties in weld metal of TP304 steel under three processes[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(4): 89-92.

第一作者简介:王子然,1990年出生,硕士;研究方向为焊接工艺及设备;发表论文7篇;Email: [285401897@qq.com](mailto:285401897@qq.com).

通信作者简介:张善保,教授级高级工程师;Email: [13304506101@163.com](mailto:13304506101@163.com).

(编辑: 郑红)