

304 不锈钢水下湿法焊接工艺

李洪亮^{1,3}, 刘 多^{1,2}, 于谊飞¹, 冯吉才^{1,3}, 唐冬雁², 孙长久¹

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学 化学系, 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工业大学(威海) 山东省特种焊接技术重点实验室, 威海 264209)

摘 要: 利用自保护镍带药芯焊丝, 对 304 不锈钢进行水下湿法焊接试验, 并分析了焊接接头的微观组织和力学性能. 结果表明, 304 不锈钢水下湿法焊接过程稳定, 飞溅少, 成形良好, 增加焊接电流会显著增加熔宽, 而熔深变化很小, 增加焊接电压, 熔宽增加, 焊缝成形变差且飞溅增多. 焊缝金属由单一的镍基 γ -固溶体相组成, 焊接接头热影响区存在晶粒粗化现象. 拉伸试验试件均断裂在焊缝处, 焊接接头平均抗拉强度值达到 450 MPa, 呈现为脆性断裂, 热影响区硬度因晶粒粗化有所降低.

关键词: 304 不锈钢; 水下湿法焊接; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG 456.5 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20151104004

0 序 言

304 不锈钢作为一种典型的奥氏体不锈钢, 在核电、水下采油平台、海底输油管道等工程结构中有广泛的应用^[1]. 国内外学者对 304 不锈钢空气中的焊接方法、焊接特点等作了较为详细的研究, 然而, 有关奥氏体不锈钢的水下焊接研究相对较少, 同时, 水下焊接不锈钢时, 研究又以高压干法或局部干法为主. 朱加雷等人^[2]实现了 304 不锈钢局部干法水下焊接, 对熔滴过渡形态、焊缝微观组织及耐蚀性等进行了研究. 由于干法水下焊接需要专门排水装置, 增加了焊接成本, 限制了局部干法使用. 水下湿法焊接由于电弧直接在水中产生, 不需排水装置, 具有简单易行、成本低的特点^[3]. 因此, 文中研究了 304 奥氏体不锈钢的水下湿法焊接, 对焊缝成形、接头微观组织及力学性能进行了分析.

1 试验方法

试验使用的母材为 SUS 304 奥氏体不锈钢, 母材化学成分及力学性能如表 1 所示, 供货状态为冷轧态. 焊接试验分为堆焊和对接两种, 对接坡口形状及尺寸如图 1 所示, 其中坡口尺寸为 60°, 留有

1.5 mm 钝边和 1 mm 底部间隙. 焊接工艺参数如表 2 所示, 其中 1 号为对接工艺参数, 2 号和 3 号均为堆焊工艺参数. 填充材料为自保护镍带药芯焊丝, 药粉中含有造气、造渣、稳弧及合金化成分. 镍带药芯焊丝可以在焊缝金属中形成单一 γ 固溶体, 与母材匹配度好, 并降低焊接热影响区 (HAZ) 扩散氢含量. 利用霍尔传感器对焊接过程中电弧电压和焊接电流进行采集和分析 (频率为 10 kHz/s).

表 1 304 不锈钢化学成分 (质量分数, %) 及力学性能
Table 1 Main composition and mechanical properties of 304 stainless steel

Mn	S	P	Si	Cr	Ni	抗拉强度 R_{eL}/MPa	屈服强度 R_m/MPa
2.00	0.045	0.030	0.075	17.1	9.0	580	210

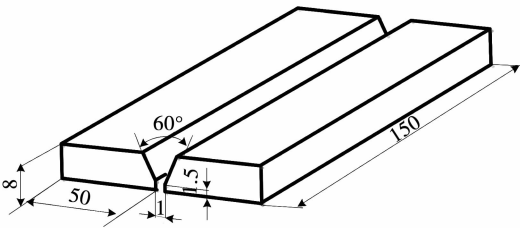


图 1 焊接接头坡口示意图 (mm)
Fig. 1 Schematic of weld joint assembly

试验所用焊接电源为松下 KR II 500 型晶闸管式恒压 MIG/MAG 弧焊电源, 行走机构为 Higerman Hi800 型数控系统. 焊接采用直流反接. 沿垂直于

收稿日期: 2015-11-04
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (HIT. MKSTISP. 2016 17); 中国博士后科学基金资助项目 (2013M541367); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目; 威海市科技计划项目 (2012DXGJ05)

焊接方向的焊缝上取样,仔细打磨抛光后并在奥林巴斯显微镜(GX 51)下观察试样的金相组织. 所用到的腐蚀剂为 5 g 硫酸铜 + 20 mL 盐酸 + 20 mL 水.

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Welding parameters

序号	电弧电压 U/V	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	水深 D/mm
1 号	28	150	170	200
2 号	28	115, 150, 190	160	200
3 号	26, 28, 30	150	160	200

利用万能试验机(Instron1186)对拉伸试样进行拉伸测试,利用扫描电镜(Quanta 200FEG)分析拉伸断口微观特征.

2 试验结果与讨论

2.1 焊接参数对堆焊接头成形影响

水下湿法焊接时,电弧气泡的存在使水下焊接过程稳定性变差. 为了探索最优水下焊接工艺参数,首先研究了焊接工艺参数对焊缝成形的影响. 图 2 为不同电流下的焊缝成形,其焊接工艺参数如表 2 中 2 号所示. 从图中可以看到电流增大所增多的熔敷金属主要用于使熔宽增加,熔深增加很小,余高保持不变.

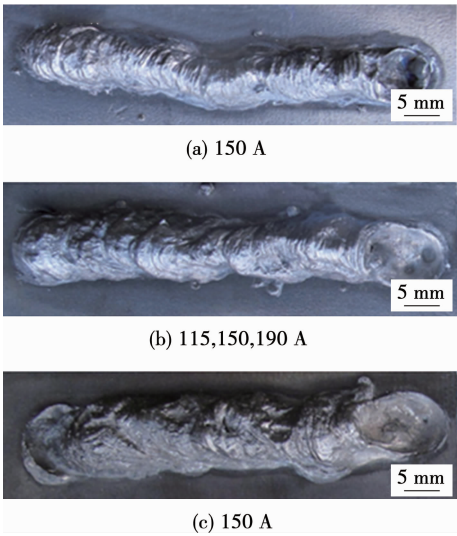


图 2 焊接电流对焊缝成形影响

Fig. 2 Effect of welding current on bead appearance

水下湿法焊接时,一部分电弧热受到水的冷却散失,一部分电弧热将水分解成氢气和氧气,造成电

弧热效率降低,熔池获得热输入变小;此外,熔池金属冷却速度快,熔深变化不明显. 图 3 为不同电压下的焊缝成形,其焊接工艺参数如表 2 中 3 号所示. 从图中可以看到随着电压增大,焊缝宽度呈增加趋势,同时飞溅数量明显增加,焊缝成形变差.

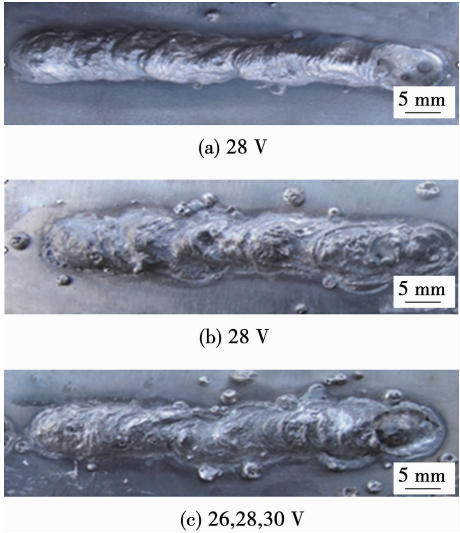


图 3 焊接电压对焊缝成形影响

Fig. 3 Effect of voltage on bead appearance

从以上分析可以看出,水下湿法焊缝成形特点与空气中存在差异,选择焊接工艺时,应该考虑到水环境对焊接过程稳定性的影响. 试验中确定的堆焊最佳工艺参数为电压 28 V,电流 140 ~ 160 A,焊接速度为 160 mm/min,其焊接过程中典型电弧电压及电流波形图如图 4 所示,从中可以看出焊接过程中电流波动较大,电压相对稳定,此外文献[4]指出熔滴过渡由排斥过渡和短路过渡组成,短路过渡频率较低.

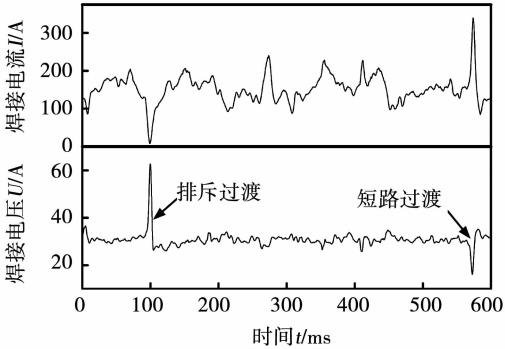


图 4 电弧电压和焊接电流典型波形

Fig. 4 Typical waveforms of arc voltage and current

2.2 焊缝宏观形貌及微观组织

图 5 为 304 不锈钢水下湿法焊接除渣前后焊缝

表面形貌,参数如表 2 中 1 号所示,可以看出镍带药芯焊丝焊缝成形良好,无咬边、夹渣等缺陷,飞溅也较少。同时,除渣前,焊缝金属表面覆盖有一层较厚渣壳,能够较好地保护焊缝金属,该熔渣的渣系属于 $\text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$,熔渣碱度为 8.85,可以有效降低焊缝金属扩散氢含量。

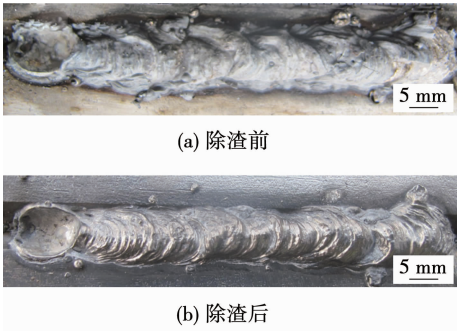


图 5 对接焊缝成形
Fig. 5 Weld surface of single pass wet welded joint

图 6 为焊接接头宏观横截面形貌,焊缝中没有微裂纹等缺陷。XRF 结果表明焊缝金属主要含有 Ni, Fe 和 Cr 元素,具体的组成如表 3 所示。焊缝金属由单一的镍基 γ 固溶体组成,如图 7 焊缝金属 XRD 结果所示。

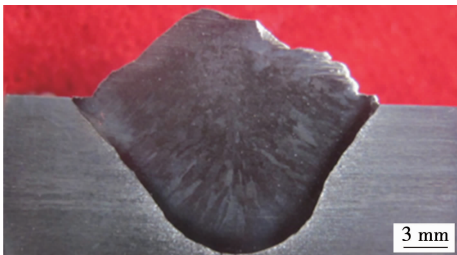


图 6 典型焊接接头横截面形貌
Fig. 6 Typical cross section of joint

表 3 焊缝金属 XRF 分析结果 (质量分数,%)				
Table 3 XRF analysis result of weld metal				
Ni	Fe	Cr	Mn	其它
63.12	25.6	8.19	2.16	0.93

焊接接头典型的微观组织如图 8 所示。焊缝金属为完全奥氏体化焊缝,如图 8a 所示。焊接接头热影响区宽度较窄,且晶粒存在粗化现象。此外,从图 8b 可以看出在镍基焊缝金属与不锈钢母材间存在一层较窄的熔合区,对该熔合区进行能谱线扫描分析,结果如图 9 所示,从图中可以看出镍基焊缝中的 Ni 元素向熔化母材中扩散,而母材中的 Cr, Fe 元素向焊缝中溶解,形成一个合金元素浓度梯度。

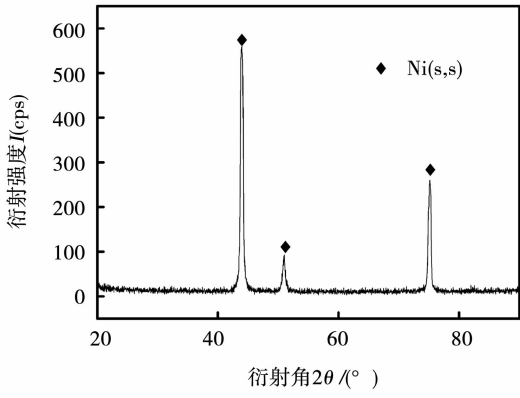
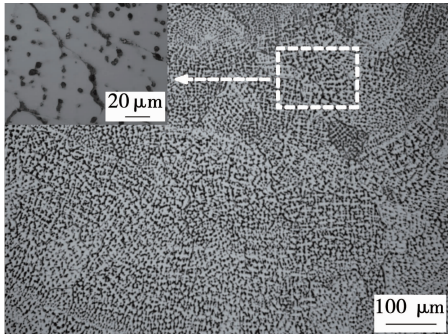
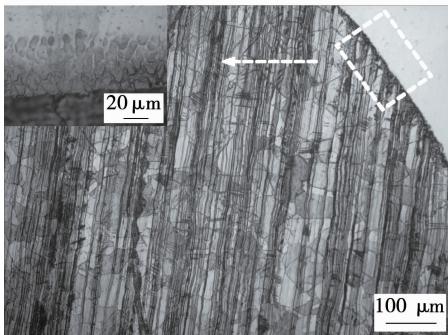


图 7 焊缝金属 XRD 结果
Fig. 7 XRD results of weld metal



(a) 焊缝金属金相组织及局部区域放大



(b) 热影响区金相组织及局部区域放大

图 8 焊接接头典型微观组织
Fig. 8 Typical microstructure of joint

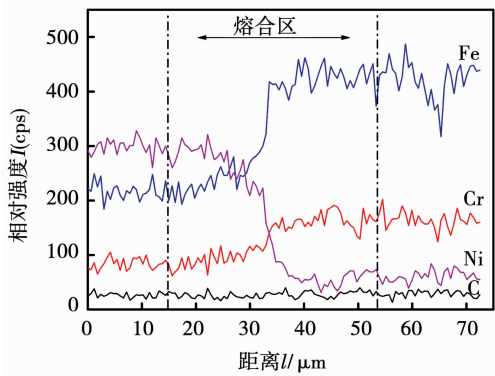


图 9 镍基焊缝与母材熔合区线扫描结果
Fig. 9 EDS results of fusion zone of weld metal/ 304 steel

2.3 焊接接头力学性能

图 10 为焊接接头从焊缝中心到母材一侧的硬度分布. 从图中可以看到焊缝金属硬度在 190 HV 左右,母材硬度在 270 HV 左右,热影响区存在一个软化区,硬度在 230 HV 左右,这是由于 HAZ 晶粒粗化所致.

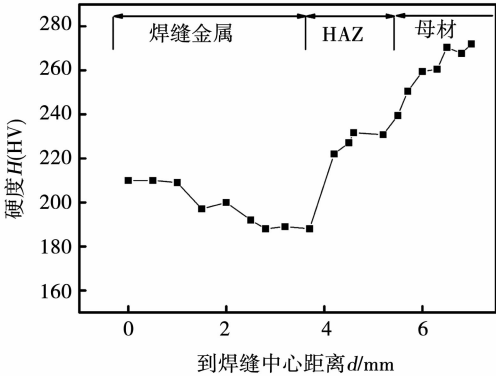


图 10 焊接接头硬度分布
Fig. 10 Micro-hardness of joint

图 11 为拉伸试验尺寸及拉伸试验断裂位置. 试样平均抗拉强度为 450 MPa,这个强度值可以满足一般不锈钢结构焊接要求. 此外,从图中可以看到三个拉伸试样均断裂于焊缝处,接头发生了一定的塑性变形. 图 12 为典型的拉伸试样微观断口形貌,断口中存在大量的解理面和少量的韧窝,属于解理断裂范畴,说明试样为脆性断裂.

此外,制作 55 mm×10 mm×5 mm 的冲击试样,

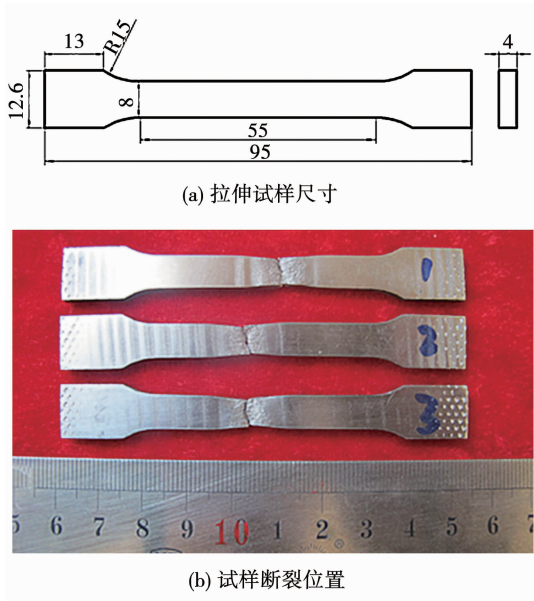


图 11 拉伸试验尺寸及断裂位置

Fig. 11 Size and crack position of tensile specimen

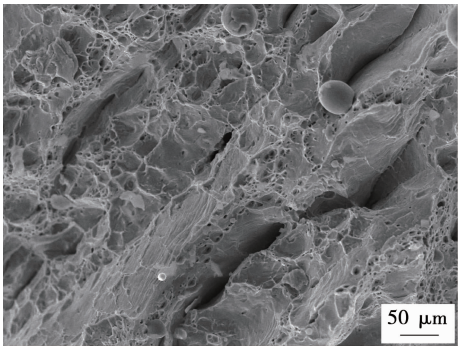


图 12 拉伸断口微观形貌
Fig. 12 SEM micrograph of fracture surface

对焊缝金属冲击韧性进行测定, 0℃下冲击韧性值为 152 J/cm². 可以看到镍基焊缝有一定的韧性.

3 结 论

(1) 利用自保护镍基药芯焊丝实现了 304 奥氏体不锈钢的水下湿法焊接,获得了良好的焊接接头,焊缝成形飞溅少、均匀、无裂纹等缺陷.

(2) 由于水介质的存在,焊接工艺参数对焊缝成形的影响与空气中焊接有所区别,焊接电流波动很大,在焊接工艺参数范围内,电流的增加主要影响熔宽,对熔深影响较小.

(3) 焊缝金属基体由单一的镍基 γ-固溶体组成,拉伸试样均断裂于焊缝金属,焊接接头平均抗拉强度达到 450 MPa.

参考文献:

[1] Prasad K S, Rao C S, Rao D N. A review on welding of AISI 304 L austenitic stainless steel[J]. Journal for Manufacturing Science and Production, 2014, 14(1): 1–11.

[2] 朱加雷, 焦向东, 周灿丰, 等. 304 不锈钢局部干法自动水下焊接[J]. 焊接学报, 2009, 30(1): 29–32.

Zhu Jialei, Jiao Xiangdong, Zhou Canfeng, et al. Local dry automatic underwater welding of 304 stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(1): 29–32.

[3] 郭 宁, 王美荣, 郭 伟, 等. 水下湿法自保护药芯焊丝[J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 13–16.

Guo Ning, Wang Meirong, Guo Wei, et al. Flux-cored wire for underwater wet welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5): 13–16.

[4] Guo N, Du Y P, Feng J C, et al. Study of underwater wet welding stability using an X-ray transmission method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 133–138.

作者简介: 李洪亮,男,1990 年出生,博士研究生. 主要从事水下焊接与切割材料研究. 发表论文 10 篇. Email: lihongliang23@163.com

通讯作者: 冯吉才,男,博士研究生导师,教授. Email: fengjc@hit.edu.cn