

# Hastelloy C276填丝等离子弧焊与氩弧焊工艺及力学性能对比分析

龚祺龙

南通远洋船舶配套有限公司 江苏南通 226013

**摘要：**基于船用脱硫洗涤塔制造项目，比较氩弧焊和填丝等离子弧焊的焊接工艺，分别研究Hastelloy C276合金的焊接工艺性能，并通过无损检测、拉伸、弯曲、腐蚀及金相分析等理化试验方法，对两种焊接方法接头质量、力学性能及耐腐蚀效果进行分析研究，探究出两种焊接工艺性能的优缺点。结果表明：两种焊接方法各项性能均满足相关标准要求。与氩弧焊相比，填丝等离子弧焊在提高效率与焊接稳定性、减少热输入、降低焊接材料成本，以及减少焊接飞溅和气孔等方面具有优越性。

**关键词：**哈氏合金；焊接工艺；等离子弧焊；氩弧焊

## Comparison and analysis of process and mechanical properties between wire plasma arc welding and argon arc welding of Hastelloy C276

GONG Qilong

Nantong Ocean Ship Equipment Co., Ltd., Nantong 226013, Jiangsu, China

**Abstract:** Based on the marine desulphurization scrubber manufacturing project, the welding process and mechanical properties of argon arc welding and wire Plasma arc welding were compared, and the welding process performance of Hastelloy C276 alloy was studied, the joint quality, mechanical properties and corrosion resistance of the two welding methods were studied by physical and chemical test methods such as corrosion and metallographic analysis. The results show that the properties of the two welding methods meet the requirements of relevant standards. Compared with argon arc welding, wire plasma arc welding has advantages in improving efficiency, welding stability, reducing heat input, reducing welding material cost, and reducing welding spatter and porosity.

**Keywords:** Hastelloy alloy; welding process; PAW; TIG

### 1 序言

船用脱硫洗涤塔需要在高温、高硫以及强腐蚀性的极端环境下，承受强酸浸泡或冲刷，并保证长期稳定、安全有效地工作，对筒体的材料选择有严格的要求。因此，船用脱硫洗涤塔制造项目过程中吸收烟气部分筒节以Hastelloy C276等合金为主，但在Hastelloy C276等合金焊接过程中，金属熔池流动

性较差，容易产生热裂纹。同时，对抗拉强度、弯曲、冲击韧度、耐腐蚀等方面的焊接接头性能也有比较高的要求<sup>[1]</sup>。

目前，大多制造厂家采用氩弧焊接Hastelloy C276合金，填丝等离子弧焊接经验相对较少。公司基于现有的填丝等离子弧焊设备与氩弧焊设备进行了工艺对比试验，探究两种焊接工艺及控制焊缝质

量的有效措施，为船用脱硫洗涤塔制造项目的制造奠定实践基础，在船用配套设备焊接领域具有重要的工程实用价值。

2 试验材料及其焊接性

本试验选用Hastelloy C276合金作为焊接工艺试

验用材料，其化学成分及力学性能见表1。考虑到Hastelloy C276合金具有优异的抗应力腐蚀开裂能力和耐局部腐蚀能力<sup>[2]</sup>，填丝等离子弧焊和氩弧焊试验分别选用规格为 $\phi 1.2\text{mm}$ 和 $\phi 2.4\text{mm}$ 的ERNiMo-4作为焊接材料，其抗拉强度 $\geq 690\text{MPa}$ ，化学成分见表2。

表1 Hastelloy C276合金主要化学成分及力学性能

| 化学成分（质量分数，%） |        |      |      |      |       |      |      |        |       |      |      | 力学性能         |              |            |
|--------------|--------|------|------|------|-------|------|------|--------|-------|------|------|--------------|--------------|------------|
| C            | S      | Cr   | Ni   | Mn   | Si    | Mo   | Fe   | P      | V     | W    | Co   | 抗拉强度<br>/MPa | 屈服强度<br>/MPa | 伸长率<br>(%) |
| <0.004       | <0.002 | 16.1 | 58.5 | <0.4 | <0.04 | 15.4 | <5.8 | <0.004 | <0.14 | <3.4 | <0.1 | 763          | 418          | 67.5       |

表2 焊丝ERNiMo-4主要化学成分（质量分数）

| C     | S    | Cr   | Ni   | Mn  | Si   | Mo   | Fe  | P     | V     | W   | Co   | Cu   |
|-------|------|------|------|-----|------|------|-----|-------|-------|-----|------|------|
| <0.01 | 0.05 | 15.6 | 58.3 | 0.5 | 0.01 | 15.7 | 5.6 | <0.01 | <0.01 | 3.5 | <0.1 | 0.08 |

相比于其他金属材料，Hastelloy C276合金热膨胀系数及热导率较低，焊接过程中导热性差，焊接熔池流动性差，液态熔覆金属不易润湿铺展开，因此易出现咬边、未熔合和未焊透等焊接缺陷。氩弧焊接时宜适当摆动，但摆动距离不宜超过3倍焊丝直径范围，并在两侧的坡口面上稍作停留，以便有足够的时间使熔化的液态金属填满两侧，防止焊接缺陷的产生。也可以通过适当增大坡口角度、增加对口间隙来防止熔合不良的现象发生<sup>[3]</sup>。

3 焊接工艺试验

试验选用尺寸为 $1000\text{mm} \times 150\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的Hastelloy C276合金试板进行对接焊接试验。焊前需要采用配备专用镍合金打磨砂轮片的打磨机将坡口两侧50mm范围内的油污、水渍、铁锈及毛刺等清理干净，以避免不必要的有害杂质进入熔池中。

在填丝等离子弧焊调试过程中，焊接间隙、错边量均应控制在1mm以内，同时装配根部需打磨齐平，否则会造成背面成形不良；而氩弧焊装配间隙和错边量可根据板厚调整，装配要求相对更低，采用如图1所示的装配形式及坡口尺寸。填丝等离子弧焊保护气体选用 $95\%\text{Ar} + 5\%\text{H}_2$ ，穿透力强，气体流量为 $20 \sim 25\text{L/min}$ ；氩弧焊保护气体选用 $99.99\%$ ，气体流量为 $15 \sim 20\text{L/min}$ 。试板背面采用 $99.99\%\text{Ar}$ 进行保护，防止焊缝根部氧化，气体流量为 $8 \sim 10\text{L/min}$ <sup>[4]</sup>。焊接时要采用小电流、多层多道焊，控制层间温度 $\leq 60^\circ\text{C}$ 等方式来严格控制焊接热输入，

以避免因焊接接头过热而导致的热裂纹等缺陷。试验用焊接参数见表3。

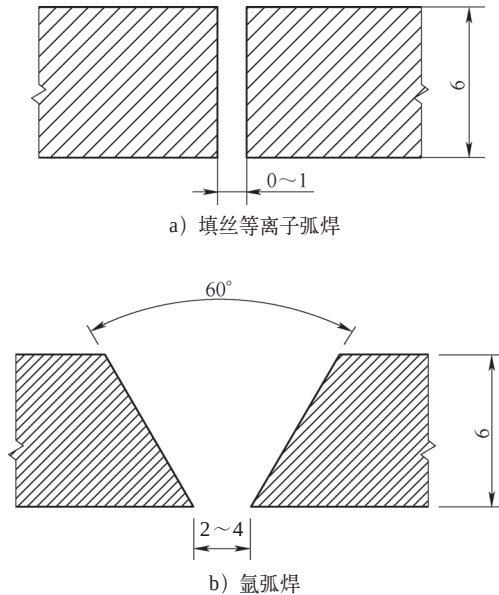


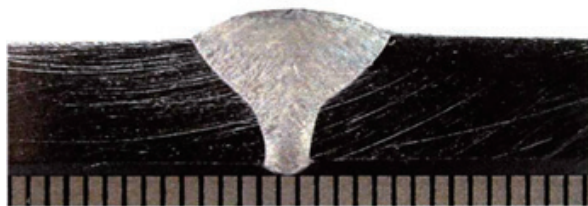
图1 焊接坡口及装配示意

表3 试验用焊接参数

| 焊接方法        | 电流<br>极性 | 焊接电流<br>/A | 电弧电压<br>/V | 焊接速度<br>/ (cm/min) | 热输入<br>/ (kJ/cm) |
|-------------|----------|------------|------------|--------------------|------------------|
| 填丝等<br>离子弧焊 | DCEN     | 210~250    | 30~36      | 160~240            | 10.2~17.1        |
| 氩弧焊         | DCEN     | 115~140    | 10~14      | 55~95              | 5.50~9.20        |

焊后进行金相检测，焊缝成形效果如图2所示。由图2可知，填丝等离子弧焊的焊缝成形深而窄，呈典型的“酒杯状”焊缝；两种焊接方法都能获得没有明显焊接缺陷的焊接接头；氩弧焊相比于填丝等

离子弧焊余高较小，其焊缝区域更大。



a) 填丝等离子弧焊



b) 氩弧焊

图2 焊缝成形效果

#### 4 试验结果对比分析

焊接完成48h后，按照ISO 5817：2023《钢、钛及其合金的熔焊接头—缺陷质量等级》B级对焊缝进行VT、RT、PT判定。结果表明，未出现气孔、裂纹、未熔合及未焊透等焊接缺陷，检测结果均合格。

根据ISO 4136：2022《金属材料焊缝的破坏性试验—横向拉伸试验》分别对填丝等离子弧焊和氩弧焊焊缝进行室温下的拉伸试验，结果分别见表4、表5。由表4、表5可看出，填丝等离子弧焊焊接接头的拉伸性能较好，抗拉强度等数据值完全满足标准要求。

按照ISO 5173：2023《钢的熔焊对接焊缝—横向根部与表部的弯曲试验》对焊缝进行室温下的弯曲试验，结果见表6、表7。由表6、表7可看出，采用弯曲直径 $D=4t$ （ $t$ 为试样厚度）的弯轴做两个面弯、两个背弯的弯曲试验，弯曲后试样无裂纹出现，表明焊接接头的弯曲性能完全符合相关标准要求。

表4 填丝等离子弧焊焊缝室温拉伸试验结果

| 试样截面尺寸/mm  | 最大拉力/kN | 抗拉强度/MPa | 断裂情况 |
|------------|---------|----------|------|
| 20.02×6.18 | 94.72   | 765      | 焊缝延断 |
| 19.98×6.24 | 95.17   | 763      | 母材延断 |

表5 氩弧焊焊缝室温拉伸试验结果

| 试样尺寸/mm    | 最大拉力/kN | 抗拉强度/MPa | 断裂情况 |
|------------|---------|----------|------|
| 20.01×6.31 | 96.27   | 762      | 焊缝延断 |
| 20.06×6.16 | 96.74   | 782      | 母材延断 |

表6 填丝等离子弧焊焊缝室温弯曲试验结果

| 试样类型 | 弯心直径/mm | 弯曲角度/(°) | 试验结果   |
|------|---------|----------|--------|
| 面弯   | 40      | 180      | 无裂纹，合格 |
| 面弯   | 40      | 180      | 无裂纹，合格 |
| 背弯   | 40      | 180      | 无裂纹，合格 |
| 背弯   | 40      | 180      | 无裂纹，合格 |

表7 氩弧焊焊缝室温弯曲试验结果

| 试样类型 | 弯心直径/mm | 弯曲角度/(°) | 试验结果   |
|------|---------|----------|--------|
| 面弯   | 40      | 180      | 无裂纹，合格 |
| 面弯   | 40      | 180      | 无裂纹，合格 |
| 背弯   | 40      | 180      | 无裂纹，合格 |
| 背弯   | 40      | 180      | 无裂纹，合格 |

按照DNV-RU-SHIP-Pt2分别对两种焊接方法的焊接接头进行麻点腐蚀试验，点蚀试样尺寸为 $t$ （板厚）×25mm×50mm。在腐蚀试验前，先将焊接接头在温度为60℃的20% $\text{HNO}_3$ +5% $\text{HF}$ 混合溶液中进行酸洗5min。然后将试样称重，测量实际尺寸后，将整个试样浸入标准要求的 $\text{FeCl}_3$ 溶液中，在40℃恒温条件下腐蚀24h，试验后进行再次称重，计算腐蚀率。结果显示，等离子弧焊的焊接接头腐蚀率为 $0.41\text{g}/\text{m}^2$ ，氩弧焊的焊接接头腐蚀率为 $0.26\text{g}/\text{m}^2$ ，均符合标准要求。

通过麻点腐蚀试验，可知填丝等离子弧焊的焊接接头腐蚀率较大，点蚀腐蚀率虽然满足DNV船级社标准的要求，但是由于填丝等离子弧焊的热输入比氩弧焊高，因此导致焊接接头腐蚀率降低，表明热输入的控制有利于耐蚀性的提高。

#### 5 焊接成本分析

与氩弧焊相比，填丝等离子弧将高能等离子体电弧与送丝机构结合在一个焊枪组件中，在提高焊接效率和降低焊接成本方面具有很大的优势，主要体现在以下几个方面。

- 1) 减少焊接操作次数，从双面焊接到单面焊接一次成形。
- 2) 填充金属的使用量减少了50%以上。
- 3) 消除了开坡口磨削过程。
- 4) 焊接速度从95cm/min提升到240cm/min，提高了150%。

#### 6 结束语

1) 填丝等离子弧焊比氩弧焊生产效率高，主要优点为焊接过程稳定性高，焊接质量重复性高，焊后焊缝修整工作量少，焊缝性能优良且成形美观。

（下转第88页）

表3 小管预制车间最近一次统计有效焊接时间 (h)

| 姓名  | 合计    | 平均   | 8月15日 | 8月16日 | 8月17日 | 8月18日 | 8月19日 |
|-----|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 陈** | 16.23 | 3.25 | 3.41  | 3.75  | 3.41  | 3.05  | 2.61  |
| 杨** | 12.18 | 2.44 | 2.08  | 2.7   | 2.19  | 2.83  | 2.38  |
| 白*  | 10.88 | 2.18 | 2.35  | 2.52  | 2.03  | 2.54  | 1.44  |
| 饶** | 9.53  | 1.91 | 2.43  | 2.68  | 1.64  | 1.48  | 1.3   |
| 张** | 8.87  | 1.77 | 0.9   | 2.33  | 4.94  | 0.46  | 0.24  |
| 齐*  | 8.67  | 1.73 | 1.04  | 2.15  | 1.7   | 2.55  | 1.23  |
| 王** | 6.42  | 1.28 | 0.73  | 2.22  | 0.45  | 2.11  | 0.91  |
| 顾*  | 3.21  | 0.64 | 0.41  | 0.27  | 0.3   | 1.01  | 1.22  |



图12 焊机超标定日期作业预警测试

超电流焊接作业。

6 结束语

物联网模块植入传统焊机，赋予焊机以智能化的特质，可引发生产力的崭新变革。通过物联网模块，实时掌握设备的数据变化，及时有效地对设备进行优化，提升工作效率；通过实时监控焊机的运行状态，进行焊接数据分析和预测，第一时间发现潜在的故障或问题，减少维修时间和成本；通过收集并传输焊机的使用数据和生产数据，为企业管理者提供管理数据，优化生产计划，提高生产管理效率，支持企业绿色精益化管理，助力核工程建安施工提质增效。

参考文献：

[1] 谢铮，梁立康，董超. 物联网技术在制造业生产过程数字化中的应用分析[J]. 今日制造与升级，2023 (3)：105-107.

[2] 张磊，王博健，于静伟，等. 数据采集系统在焊接领域中的应用现状[J]. 电焊机，2020，50 (12)：26-31，109-110.

[3] 田志勇，胡安成，冯英超，等. 焊接有效工时分析系统设计[J]. 金属加工（热加工），2021 (10)：65-67.

[4] 王象元，王府强，刘城，等. 基于PLC的焊接参数采集系统设计与应用[J]. 焊接技术，2020，49 (6)：69-72.

[5] 周一峰. 基于WiFi的电焊机网络监控系统设计与实现[D]. 成都：成都理工大学，2018.

[6] 郭宇骞. 基于边缘计算与物联网技术的信息系统项目实时监测及控制平台开发[J]. 科技创新与应用，2023，13 (34)：132-135.

MW 20240409

(上接第81页)

2) 填丝等离子弧焊焊接Hastelloy C276合金时理化性能均能符合要求，但热输入比氩弧焊多层多道焊高，因此焊接过程要严格控制，调节合适的焊接参数，以防点蚀不合格概率增加。

3) 通过对比可发现，填丝等离子弧焊对于船用脱硫洗涤塔的制造具有很大优势。相比于氩弧焊，填丝等离子弧焊自动化程度高，只要有基本焊接知识的焊接操作人员就较容易掌握，既能保证焊接质量，又能节约大量人工费用。

参考文献：

[1] 刘帅，吴冬冬，柴东升，等. Hastelloy C-276薄板

激光焊接接头疲劳性能[J]. 中国有色金属学报，2016，26 (12)：2555-2563.

[2] 余磊，曹睿. 镍基合金焊接裂纹研究现状[J]. 金属学报，2021，57 (1)：16-28.

[3] 毛琪钦，王龙. 纯镍与N10003哈氏合金TIG焊接工艺及质量控制研究[J]. 电焊机，2023，53 (12)：22-27.

[4] 陈俭峰，王昌盛，鲍碧霞. 深熔氩弧焊与等离子弧焊工艺性能对比分析[J]. 金属加工（热加工），2020 (8)：37-39.

MW 20240413