

不锈钢薄壁细管 TIG 焊加热水冷矫正工艺试验及应用

朱池

(中船澄西船舶修造有限公司, 江苏 江阴 214433)

摘要 在 18600DWT 化学品船建造中, 涉及到大量 S316L 不锈钢小直径薄壁管子焊接。为了改善薄壁细管子焊后变形, 采用手工氩弧焊的电弧加热, 然后快速水冷方式矫正不锈钢管焊后变形, 通过管对接试验, 选择合理焊接参数加热和水冷要求, 开发出不锈钢小直径薄壁管 TIG 焊加热水冷矫正工艺, 并应用于实船 S316L 不锈钢加热盘管的矫正变形, 取得良好的效果。

关键词 不锈钢管 TIG 水冷矫正 试验 应用

中图分类号: U671 文献标识码: A

Water cooling correction test and application of TIG welding for thin wall stainless pipes

Zhu Chi

(Chengxi Shipyard Co., Ltd, Jiangyin Jiangsu 214433, China)

Abstract In the construction of 18600DWT chemical ship, a large number of S316L stainless steel thin-walled pipes are welded. In order to improve the post weld deformation of thin pipes, the arc heating by manual argon arc welding is adopted, and then the deformation of the stainless steel pipe is corrected quickly by water cooling. Through the pipe butt test, the reasonable welding parameters are selected, and the development is not developed. The heating and cooling technology for TIG welding of small diameter and thin wall pipe of stainless steel has been applied to the rectification distortion of the S316L stainless steel heating coil, and achieved good results.

Keywords stainless pipe TIG water cooling Testing application

0 前言

在 18600DWT 化学船(见图 1 所示)建造中, 液货舱中加热盘管为 S316L 不锈钢小直径薄壁管, 采用固定胎架绑扎管方式进行装配, 然后对弯管后的管管对接装焊, 再对管口进行密封和管内冲氩气, 最后进行氩弧焊。焊接过程中, 不锈钢在电弧热 5000–6000℃ 高温中熔合母材及填充金属, 然后再重新结晶凝固; 由于填充金属和母材熔合形成焊接接头, 必然带来管口接缝变形, 而不锈钢不能进行火工矫正, 因为火工矫正会带来焊缝增碳, 造成贫铬, 从而降低管接缝的耐蚀性能。机械矫正, 容易造成管材表明划伤。为此根据氩弧焊焊接原理, 对管子进行充气, 然后在管子外侧进行氩弧焊焊接, 不填丝, 利用氩弧焊的钨极产生电弧热加水冷方式完成焊接变形矫正, 通过试验表明上述方法可行; 既能替代机械矫正, 又能保证焊缝性能。



图 1 18600DWT 化学品船

2 S316L 奥氏体不锈钢焊接性

由于奥氏体钢热导率小、线膨胀系数大, 焊缝金属在凝固时会在焊接接头区产生较大的拉应力,

作者简介: 朱池 (1985-), 男, 工程师, 中船澄西船舶修造有限公司, 主要从事船舶修造中焊接技术工艺设计和试验工作, 联系电话 15052153627。

同时焊缝的粗大柱状晶组织，易于在焊接过程中带入有害的杂质，造成偏析和晶粒间液态夹层的形成，所以极易使得在焊接过程中，产生热裂纹的倾向。

奥氏体不锈钢在船上应用大多是管系，在制作过程中及焊接后均会产生铁素体或马氏体存在，所以冷加工后必须经过固溶处理，而焊接后有些已不可能再固溶处理了，所以必须控制铁素体，一般要求奥氏体不锈钢铁素体含量应小于 2%，所以焊材、焊接工艺、控制焊接过程非常重要。

3 试验与分析

3.1 焊接材料和方法的选择

焊接方法及焊接材料的选择 根据 S316L 奥氏体不锈钢的焊接性分析，GTS-S316L 高合金焊材可以避免焊接过程中造成过多奥氏体转变、合金元素烧损及耐蚀性降低，采用用热输入量低的氩弧焊，为了控制接头过热和避免晶界析出，故而采用钨极氩焊打底、填充及盖面。焊接设备采用唐山松下公司生产的氩弧焊焊机进行接头试样的焊接。

该项焊接试验母材为 S316L 奥氏体不锈钢管子,其焊接试验管材规格为：Φ76*3*150mm*4 组管材。选用焊接材料、方法选择及化学成分见表 3、表 4 和表 5 所示。

表 3 选择焊接方法和焊材

焊接方法	焊接材料牌号	焊接材料标准号	尺寸（mm）	制造厂
TIG	GTS-316LT	AWS A5.9 ER316L	Φ2.0	京群

表 4 GTS-S316L 焊材化学成分

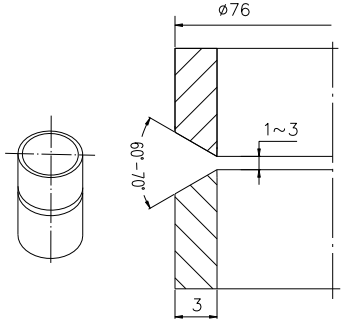
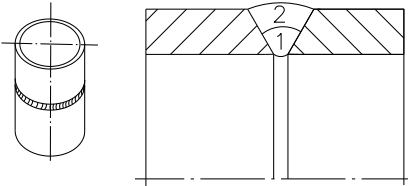
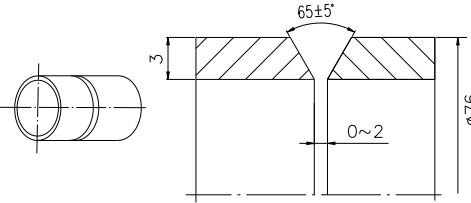
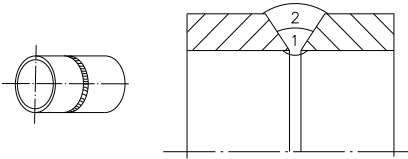
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
0.016	0.53	2.05	0.015	0.008	18.75	12.08	2.31	0.01	0.21

表 5 GTS-S316L 焊材的力学性能

焊材	屈服强度 （MPa）	抗拉强度 （MPa）	伸长率 （%）	冲击韧性 （-196℃） 平均值（J）
GTS-316LT	-	≥605	≥37	83

3.2 接头形式设计 设计接头形式、坡口形式与尺寸见表 6 所示。

表 6 坡口形式

接头形式	坡口角度（°）及精度要求（mm）	焊缝成形
垂直固定焊（2G）		
水平固定焊（5G）		

3.3 焊接工艺要领

焊前准备 S316L 奥氏体不锈钢管子可以采用机械方式制备坡口。坡口及其两侧各 30mm 范围内

应用机械方法及无水酒精进行表面清理，清除表面的油污、金属屑、毛刺及其他污染物。

保护气体 氩气，纯度 99.99%，气体流量 10-15L/min，管内采用背侧充气保护，其他流量为 10-18L/min。氩弧焊接时，提前送气和滞后送气为 5 秒。 焊接电源极性 采用直流正接方式。

定位焊要求 采用对称两点定位焊，定位焊采用手工 TIG 焊，定位焊长度约 10mm, 焊丝牌号 GTS-S316L，直径 2.0mm。保证管对接在一条直线上。

焊接顺序及焊道的布置 为了保证焊接质量，采用氩弧焊打底、填充及盖面，焊接顺序见表 6 所示焊缝成形。

焊接参数 具体焊接参数见表 7 和表 8 所示。焊接过程中的注意事项如下：第一，打底焊道完成后应及时进行填充焊接，焊缝应尽量连续一次完成。若因故停焊，应采取防止裂纹的措施，缓慢降低焊缝温度。重新施焊前应检查确认无裂纹后，才可按原工艺要求继续施焊。

表 7 管子横对接位置焊接参数

焊道	方法	位置	直径 (mm)	极性	电压 (V)	电流 (A)	气体流量 (L/min)	焊接速度 (cm/min)
打底焊	TIG	2G	φ 2.0	DC (-)	8-9	65-80	10-15	6.5-7.4
盖面焊	TIG	2G	φ 2.0	DC (-)	9-10	80-90	10-15	7.0-8.0

表 8 管子水平固定接位置焊接参数

焊道	方法	位置	直径 (mm)	极性	电压 (V)	电流 (A)	气体流量 (L/min)	焊接速度 (cm/min)
打底焊	TIG	5G	φ 2.0	DC (-)	8-9	68-78	10-15	6.0-7.0
盖面焊	TIG	5G	φ 2.0	DC (-)	9-10	78-86	10-15	6.0-8.0

焊接过程要求 采用短弧焊接，层间温度不低预热温度且不能超过 100℃（焊接每道焊缝都应进行层温测量）。焊缝背面也进行测温，每焊接一道，背面进行一次测温，最终温度控制 120 摄氏度以下。焊接顺序，从一端焊向另一端。焊完每道焊缝后检查，发现焊接缺陷应及时清除。采取多层多道焊接，每层厚度 3-4mm，焊道宽度 6-8mm，见图 2 和图 3 所示。



图 2 焊接不锈钢管子

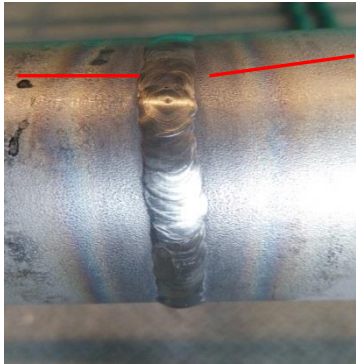


图 3 焊后不锈钢管子变形

氩弧焊矫正 先对管子进行充足量氩气，然后对管子进行氩弧焊矫正，然后进行测温，并水冷，最终完成管子角变形矫正。见图 4 和图 5 所示。

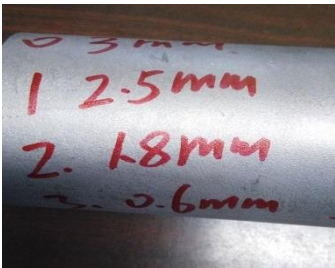


图 4 氩弧焊加热+水冷数据记录

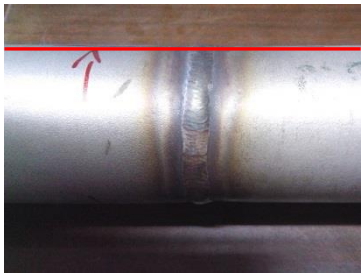


图 5 矫正后不锈钢状态

在焊接收弧时一等要填满弧坑，再收弧处多停留 3-5 秒，避免产生弧坑裂纹，如出现弧坑裂纹，应立即打磨处理。焊接过程中避免使材料与铜、黄铜、锌发生接触，以免铜、锌渗入钢的晶粒边界引起裂纹。

为了保证 S316L 奥氏体不锈钢管焊接性，焊接热输入量的控制非常重要，焊接电流不宜过大，宜采用快速多道焊以减轻焊道过热，并通过多道焊的重新加热作用细化晶粒。多道焊时要控制层间温度，应采用小热输入施焊，尽量控制在 0.8-1.5KJ/mm 以下，多层焊层间温度控制在≤150℃，避免接头过热。在焊接过程中，焊丝不能脱离氩气保护范围内。

氩弧焊 S316L 不锈钢高合金钢在收尾时，由于焊件吸收了大量焊接热能量，焊缝金属的温度不断升高，收弧速度快造成高温液态的金属快速冷却、收缩，液态熔池金属缺少有效保护造成的。为了防止缩孔，在根部焊时尽量将电弧引到坡口面处进行收弧减少缩孔；在进行填充盖面时，收弧时轻抬焊枪，适当的加快行走速度，使熔池逐渐缩小（在氩弧焊机中设置电流衰减作用），直至熄弧，可以消除焊接缩孔。

焊后呈过热或氧化颜色的部位，应仔细打磨掉。焊后采取缓慢冷却措施，以防弧坑裂纹。为获得最佳耐腐蚀能力，焊后应对焊件做酸性钝化处理。

4 试验结果与分析

管材焊接工艺评定采用 DNV. GL 船级社规范、ASME Section IX 及 ASME B31.3 标准要求。各项性能测试试验是严格按照船级社标准及产品使用工况要求进行。管材焊缝试验内容包括外观检测、无损探伤、拉伸试验、弯曲试验、晶间腐蚀试验、宏观金相、微观金相、奥氏体含量。

4.1 无损探伤检测 焊接结束后 48 小时，对焊接试样焊缝进行 100%外观检测，焊缝及热影响区未发现咬边、表面气孔、裂纹及夹渣等缺陷，焊缝余高 0.3-1.0mm，焊缝与母材之间过渡光滑；焊接试验焊缝经过 X 光射线探伤和 PT 表明检测，未发现裂纹、未熔合、未焊透及夹渣等缺陷，焊接接头焊缝质量满足检验标准要求。

4.2 拉伸试验 将拉伸试验样固定在某型万能试验机上，对其施加拉应力，造成试样轴向伸长直到拉断为止，是衡量材料强度的主要指标。拉伸试验结果如表 9 所示。根据试验结果，可看出拉伸试验结果满足规范要求。

表 9 横向拉伸试验结果

焊接位置	试样编号/类型	抗拉强度 (Mpa)	断裂位置
管子垂直固定焊	91 横向拉伸	610	断于母材
	92 横向拉伸	620	断于母材
管子水平固定焊	101 横向拉伸	609	断于母材
	102 横向拉伸	601	断于母材

4.3 弯曲试验 弯曲试验是考核材料承受变形的能力，将加工好的标注弯曲试验固定在某型万能试验机上进行弯曲试验。规范要求取 2 正弯和 2 反弯试验用的 24mm 的直径进行弯曲试验，弯曲角度 180°，在弯曲后的试样表面无裂纹且在任何方向上无长度>3mm 的其他缺陷，试验结果满足规范要求。

4.4 宏观金相及微观金相 焊缝宏观断面检查发现焊缝完全焊透，无裂纹等缺陷。如表 10 所示。

表 10 宏观金相评定

试验编号	宏观金相图片	检验结果
94		焊缝完全焊透，无裂纹等缺陷
104		焊缝完全焊透，无裂纹等缺陷

4.5 晶间腐蚀试验 按照 DNV. GL 规范要求进行，试验合格，见下表 11 所示。

表 11 晶间腐蚀试验评定

试验 编号	检验 项目	晶间 腐蚀	技术 要求	检验 结果
95/105	硫酸-硫酸 铜腐蚀试验		腐蚀时间：16 小时 敏化处理：675℃，保 温 1h，水冷，弯曲角度 90°	试验未 见裂纹

4.6 铁素含量测定 焊缝、熔合线和热影响区均为奥氏体组织和 1.51%以下的铁素体组织，没有发现晶间析出相的产生。满足技术条件要求，可以保证力学性能和耐蚀性能。

4.7 抗点腐蚀试验 进行 ASTM G 48 C 类腐蚀试验，试验合格, 见下表 12 所示。

表 12 抗点腐蚀试验评定

试验 编号	检验项目		单 位	技术 要求	检验结果	检测标准
98/108	耐麻点(三氯 化铁)腐蚀试 验三氯化铁 麻点试验	试验温度	℃	—	20	ASTM G48-2011 C 法
		试验尺寸	mm	—	49.45*24.14*3.84 49.26x24.10x3.96	
		检测周期	h	—	72	
		试验后麻点情况	—	—	无麻点	

在点腐蚀结果表明，焊接接头具有良好的耐氯离子局部腐蚀性能。晶间腐蚀试验结果表明，焊接接头具有良好的抗晶间腐蚀性能。

综上所述表明，拟定的焊接工艺试验满足工艺要求，焊接参数合适，试验结果满足相关标准技术要求，焊接接头性能符合设计图纸要求。

5 实船应用情况

在公司首次完成 18600DWT 化学品船中，焊接工艺评定试验取得了 DNV 船级社认可，管系焊接过程及产品见图 7 所示。通过 S316L 奥氏体不锈钢管系的焊接成功实践，使我们掌握了 S316L 奥氏体不锈钢的焊接，积累了经验数据，对今后船舶建造、修理及改装结构制造及此类材料的提供了技术经验。施工车间严格按照焊接工艺进行施工，最终 18600 化学船实船焊接，对不锈钢加热盘管接头进行 RT+PT 检查，焊缝全部合格，实船应用过程见图 6-图 9 所示。



图 6 焊接不锈钢管子



图 7 焊后不锈钢管子变形



图8 氩弧焊加热+水冷管子



图9 矫正后不锈钢状态

6 结论

采用钨极氩弧焊打底、填充及盖面，配合 GTS-S316L 焊丝焊接 S316L 奥氏体不锈钢管系，采用氩弧焊电弧加热+水冷方式矫正小直径薄壁焊后变形，在合理的焊接工艺条件下，能够得到高质量的焊接接头，焊接工艺评定试验的各项性能指标均符合技术要求，不仅掌握了 S316L 奥氏体不锈钢管材的钨极氩弧焊打底、填充及盖面的管系焊接技术，还进行小直径薄壁管氩弧焊电弧矫正焊后变形多次试验，获得满意效果，为今后化学品船生产提供了技术经验。

S316L 奥氏体不锈钢抗腐蚀、抗点腐蚀性能良好，但用在不同产品上要求不同，必须要进行焊材、焊接工艺方法选择和矫正工艺试验研究。

在 18600 化学船奥氏体不锈钢加热盘管子焊后矫正新方法实船成功应用；也能为类似船造修造提高技术支持。对产品制定更加合理焊接工艺和现场适用性提供借鉴。解决了现场焊接关键位置焊接难点，为生产赢得了时间和节省返工成本。

[参考文献]

- [1] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册 (M). 北京, 机械工业出版社, 2003
- [2] ASME 锅炉及压力容器规范: 2010 第 9 卷 (M). 北京, 中国石化出版社, 2011
- [3] 船舶焊接手册编写委员会, 船舶焊接手册 (M). 国防工业出版社, 1995
- [4] 陈伯鑫. 焊接工程缺欠分析与对策 (M). 北京, 机械工业出版社, 1998
- [5] 陆世英. 奥氏体不锈钢和高镍耐蚀合金 [M]. 北京, 化学工业出版社, 2012



江苏船舶微信公众号，欢迎关注，欢迎投稿！