

304/Q345R复合板熔化极气体保护焊焊接工艺研究

富泉¹, 王占亮¹, 童立里¹, 周荣田², 熊操², 王梗蕊²

1. 武汉重型机床集团有限公司 湖北武汉 430205

2. 湖北交投襄阳文旅发展有限公司 湖北襄阳 441000

摘要: 复合板因其优越的性能而在工业制造中得到了广泛应用, 而焊接工艺则直接影响着复合板的使用寿命和性能表现。通过以304不锈钢与Q345R钢板的复合板为研究对象, 采用熔化极气体保护焊(MAG)技术, 对焊接接头进行系统性评价。通过材料选择、焊接参数设置(焊接电流180~200A、电弧电压22~24V、焊接速度10~12cm/min)、焊后热处理及无损检测, 评估焊接接头质量与性能。最终确定基层焊接材料选用ER50-6实心焊丝, 过渡层焊接材料选用ER309实心焊丝, 复层焊接材料选用ER308实心焊丝。结果表明: 适当的焊接材料选择与焊接参数设置对复合板焊接质量至关重要, 焊后热处理显著降低了焊接接头的残余应力, 并改善了焊接接头的组织结构, 焊接接头的抗拉强度达到519~521MPa, 屈服强度达到359~374MPa, 断后伸长率达到28.5%~30.0%。

关键词: 304/Q345R复合板; 焊接工艺; 焊接性能

Study on the welding process of 304/Q345R composite plate using metal active gas welding

FU Quan¹, WANG Zhanliang¹, TONG Lili¹, ZHOU Rongtian², XIONG Cao², WANG Gengrui²

1. Wuhan Heavy Machine Tool Group Co., Ltd., Wuhan 430205, Hubei, China

2. Hubei Jiaotou Xiangyang Culture and Tourism Development Co., Ltd., Xiangyang 441000, Hubei, China

Abstract: Composite plates have found widespread application in industrial manufacturing due to their superior properties. The welding process directly impacts the service life and performance of these composite plates. This study focuses on composite plates made of 304 stainless steel and Q345R steel, utilizing Metal Active Gas (MAG) welding technology to systematically evaluate the welded joints. Through the selection of materials, the setting of welding process parameters (welding current: 180~200A, arc voltage: 22~24V, welding speed: 10~12cm/min), post-weld heat treatment, and non-destructive testing, the quality and performance of the welded joints were assessed. The base layer welding material was chosen as solid ER50-6 wire, the transition layer welding material as solid ER309 wire, and the cladding layer welding material as solid ER308 wire. Results indicate that appropriate selection of welding materials and process parameters is crucial for the welding quality of composite plates. Post-weld heat treatment significantly reduces the residual stress in the welded joints and improves the microstructure of the welded joints. The tensile strength of the welded joints reached 519~521MPa, the yield strength reached 359~374MPa, and the elongation after fracture reached 28.5%~30.0%.

Keywords: 304/Q345R composite plate; welding procedure; welding performance

1 序言

复合板因其结合了两种或多种不同材料的优点，在压力容器、化工设备制造等领域得到了广泛应用。304不锈钢与Q345R钢板的复合板，既具备不锈钢的耐蚀性，又具有碳素钢的良好力学性能，因此在实际工程应用中具有重要意义。本文以304/Q345R复合板为研究对象，为提高工作效率，采用熔化极气体保护焊（MAG）工艺方法对复合板进行对接平焊、对接立焊，焊后采用射线检测（RT）、超声波检测（UT）和渗透检测（PT）方法进行无损检测，并分析焊接接头的金相组织、力学性能，验证焊接材料选择、焊接参数选取、焊后处理等工艺条件，以此掌握更科学的焊接工艺，为不锈钢复合板的焊接提供技术保证。

2 复合板材料特性

试验用304/Q345R轧制不锈钢复合板，基层为Q345R钢，厚度46mm，复层为304不锈钢，厚度为4mm，总厚度为50mm。

基层Q345R钢按照国际焊接学会推荐的碳当量公式计算，其 $CE=0.45\%$ ，Q345R钢是低合金高强度钢，多用于压力容器，其性能与Q355（16Mn）钢相近，焊接性较好，一般不易产生冷裂纹、热裂纹^[1]。但本项目板厚较大，在焊接过程中仍需要进行预热和层间温度控制。

复层304不锈钢其成分为1Cr18Ni9Ti，具有良好的耐蚀性和焊接性，多数薄板采用钨极惰性气体保护焊（TIG）。本项目为中厚板，焊接工程量大，为提高工作效率，因此采用熔化极气体保护焊（MAG）。不锈钢复合板的化学成分见表1，力学性能见表2。

表1 不锈钢复合板化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Cr	Mn	Si	Ni	S	P
304不锈钢	0.018	18.2	1.61	0.36	8.00	0.001	0.032
Q345R钢	0.16	0.032	1.51	0.28	0.11	0.003	0.016

表2 304/Q345R不锈钢复合板力学性能

抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长率 （%）	剪切强度 /MPa
513	373	33	349

3 焊接工艺评定试验

3.1 焊接材料选择

（1）基层焊接材料选用 按照焊缝金属的主要成分与母材金属相同或相近，以及等强匹配原则，在基层焊接过程中，选用ER50-6实心焊丝，直径1.2mm。

（2）过渡层焊接材料选用 过渡层焊接材料的选择尤为关键，为了确保基层与复层之间具有良好的冶金结合，同时也要保证过渡层具有一定的耐蚀性和力学性能，不锈钢复合板过渡层焊接材料选用ER309（H10Cr24Ni13、H12Cr24Ni13Si）实心焊丝，直径1.2mm。

（3）复层焊接材料选用 按照相等化学成分的原则，不锈钢复合钢板复层焊接时，焊接材料选用ER308实心焊丝，直径1.2mm。

（4）保护气体选用 保护气体选择80%Ar+20%CO₂和98%Ar+2%CO₂的两种混合气体，纯度为99.9%。

表3 保护气体选用

项目	气体	纯度（%）
基层	80%Ar+20%CO ₂	99.9
过渡层	98%Ar+2%CO ₂	99.9
复层	98%Ar+2%CO ₂	99.9

3.2 坡口形式

采用对称双面50°的V形坡口，钝边1mm，机械加工成形，焊前预留间隙2mm，如图1所示。

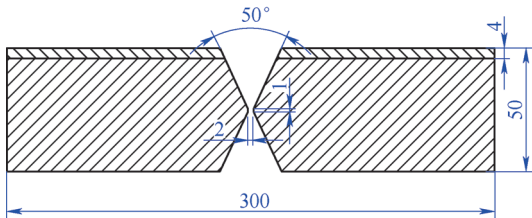


图1 坡口及组对形式

3.3 焊接顺序

焊接顺序为基层→过渡层→覆盖层。过渡层属于复层和连接基层的核心位置，目的是在基层和复层之间建立一个良好的冶金结合，可有效地防止稀释和碳迁移等问题，在过渡层焊接过程中应避免太

厚，造成接头冲击性能下降^[2]。过渡层控制焊接层厚3~4mm，从边缘开始焊接，逐渐向中心移动，焊接顺序如图2所示。焊前清洁焊接区域，去除油污、锈蚀和其他杂质；各层之间焊前采用机械打磨清根^[3]。

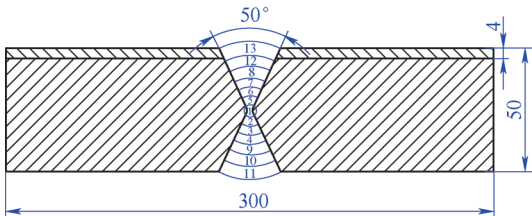


图2 焊接顺序

3.4 焊前预热

46mm厚的Q345R钢板预热温度≥50℃，可以减少焊接区域的温度梯度，降低焊接应力，减少裂纹的产生，并改善焊接接头的组织和性能。

3.5 焊接参数

不锈钢复合板焊接参数见表4。

表4 不锈钢复合板焊接参数

焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 / (cm/min)	气体流量 / (L/min)
180~200	22~24	99.9	15~20

3.6 焊后无损检测

焊接完成24h后对焊件进行了UT、PT检测，经专业无损检测人员检查合格后进行热处理。

3.7 焊后热处理

为了消除焊接残余应力，稳定焊缝组织，焊接完成后进行热处理，升温速度为80℃/h，升温至560℃保温4h，随炉冷却至150~200℃出炉冷却。

3.8 试验结果

按照NB/T 47014—2023《承压设备焊接工艺评定》要求制作试板。施焊完毕后按照NB/T 47013.3—2023《承压设备无损检测 第3部分：超声检测》对焊缝进行100%UT检测，结果为Ⅰ级；按照NB/T 47013.5—2015《承压设备无损检测 第5部分：渗透检测》对304复层进行100%PT检测，结果为Ⅰ级。合格后进行理化试验及性能检测。

对不锈钢复合板试板焊接接头进行取样，测试试样如图3所示。焊接接头的拉伸、冲击及弯曲试验结果见表5~表7。

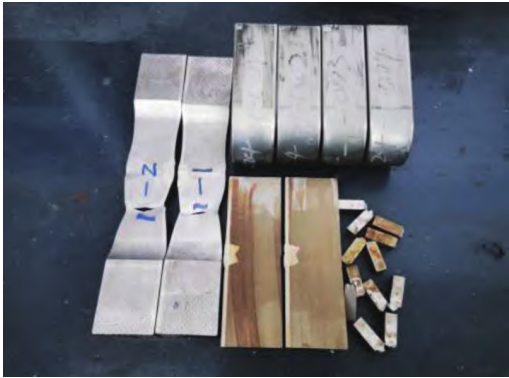


图3 测试试样

表5 拉伸试验结果

试件编号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长率 (%)	断裂部位	结果
1	519	359	28.5	母材	合格
2	521	374	30.0	母材	合格

注：抗拉强度≥490MPa、屈服强度≥315MPa、断后伸长率≥24%为合格。

表6 冲击试验结果

试件编号	试样尺寸 /mm	温度 /℃	冲击吸收能量/J				结果
			1	2	3	平均值	
3	55×10×10	0	149.3	159.7	132.8	147.3	合格
4	55×10×10	0	142.3	184.6	169.9	165.6	合格

注：冲击吸收能量≥34J为合格。

表7 弯曲试验结果

试件编号	弯曲角度 / (°)	压头直径 /mm	检测结果				结果
			1	2	3	4	
5	180	40	无单条长度>3mm的开口裂纹				合格

注：沿任何方向不得有单条长度>3mm的开口裂纹为合格。

3.9 金相组织分析

通过金相组织测试，基层Q345R钢区域呈现出典型的低合金高强度钢的组织结构，主要由铁素体和珠光体组成。随着向过渡层靠近，组织结构逐渐发生变化，出现合金元素的扩散和混合现象。过渡层成分主要为铁素体、奥氏体以及合金碳化物等成分，这些成分的分布对于防止基层和复层之间的稀释和碳迁移起到了关键作用。在复层304不锈钢区域，组织结构主要为奥氏体，其化学成分保持了304

不锈钢的基本特征,具有良好的耐蚀性。

通过硬度检测发现,基层Q345R区域硬度相对较低,由于过渡层复杂的组织结构,因此硬度呈现出一定的梯度变化,从靠近基层一侧到靠近复层一侧逐渐升高。复层304不锈钢区域硬度相对较高,符合各层本身的力学性能特点^[4]。

4 产品焊接

1) 对304/Q345R轧制不锈钢复合板材料进行入厂检验,包括检查质量证明书、材质单、出厂检验报告、试验报告,并进行外观和规格检查(如钢板厚度、平整度、表面质量检查),以及复层局部超声波和表面渗透检测抽查。

2) 在上述焊接工艺评定支持的基础上,充分考虑坡口形式和尺寸的设计^[5],可以避免产生缺陷,有利于焊接操作。

3) 焊接装配前,对坡口及周边50mm范围内进行打磨直至露出金属光泽,以免油污、锈、水等有害物质影响焊接质量。不锈钢复合板装配错边量过大,可能导致焊接过程中基层材料渗入不锈钢复层焊缝,从而使不锈钢焊缝出现生锈甚至裂纹的情况,在装配时严格控制坡口的错边量^[6]。在工程装配过程中,以复层4mm的厚度为基准,控制错边量 $\leq 2\text{mm}$,即错边量不得大于复层厚度的1/2。

4) 焊接装配定位焊时,在不锈钢坡口两侧各100mm范围内涂刷防飞溅涂料,防止定位焊过程中飞溅对不锈钢造成污染。打磨Q345R基层采用普通砂轮,打磨304不锈钢复层采用不锈钢专用砂轮,严禁混用不同材质的砂轮,以避免铁离子对不锈钢复层造成污染。严禁用碳素钢焊接材料在复层、过渡层上进行定位焊。

5) 在焊接过程中严格按图样技术要求和焊接工艺卡中的焊接参数施焊,现场质检人员检查每道焊缝,重点检查焊缝表面,注重层间清理,上道焊接不合格,不允许进入下道焊接。

6) 当过渡层焊接到距复层界面3mm左右时,在坡口两侧各焊接一道,再向中间进行焊接,防止基层焊缝融化到过渡层和复层中。过渡层焊接如图4所示。

7) 焊接完成24h后对工件进行无损检测,当发现缺陷时,若缺陷在基层,则采用碳弧气刨从基

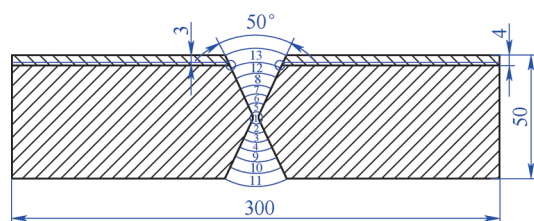


图4 过渡层焊接示意

层侧消除缺陷;若缺陷在过渡层或复层,则采用不锈钢砂轮打磨清除,不允许使用碳弧气刨,且严格按照焊接工艺卡执行焊接要求。工件完成上述工序后,按热处理工艺进行消除应力热处理。

5 结束语

本研究通过优化304/Q345R不锈钢复合板的熔化极气体保护焊工艺,成功提高了焊接接头的质量与性能,产品质量达到相关工程产品的焊接要求。证明该焊接工艺选择的焊接方法、焊接材料、坡口形式、焊接参数及质量控制措施是合理、可靠的,符合生产需要;该项目工艺主要采用了熔化极气体保护焊,有助于提高工作效率,降低劳动强度。合理的焊接材料选择和焊接参数设置,结合焊后热处理,显著降低了焊接接头的残余应力,改善了焊接接头的组织结构。该工艺及控制过程对于类似工程项目具有一定的借鉴意义和实例依据。

参考文献:

- [1] 贾登峰,赵菲,黄庆学,等. 不锈钢复合板的开发及其在焊接工程中的应用[J]. 热加工工艺, 2019, 48 (10): 21-24, 30.
- [2] 陈忱. 不锈钢碳钢复合板的焊接工艺及接头组织性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [3] 戴维. 巢马铁路大桥不锈钢复合板焊接工艺研究[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (6): 101-105.
- [4] 贾登峰,夏腾辉,杜春平,等. 304/Q345R复合板焊接接头微观组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2025, 54 (3): 41-44, 50.
- [5] 王迎君,郭太平. 复合钢板焊接坡口的制定[J]. 大型铸锻件, 2015 (4): 34-36.
- [6] 于彬. 不锈钢复合板焊接质量控制研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39 (11): 173-174.

(收稿日期: 20250116)