



# 国内主要钢厂海工用EQ51 超高强钢焊接试验研究

高宗让 李德风

**【摘要】** 本文通过焊接工艺试验，对国内主要钢厂生产的EQ51钢板进行焊接性分析研究。结果表明，不同钢厂生产的EQ51钢板焊接性能有所差异；随着厚度变小，焊接热影响区冲击韧性降低，焊接性变差。

**关键词：** 钢厂；EQ51；焊接性

## 1. 概述

海洋工程一直备受世界的高度关注，EQ系列超高强钢以其足够的强度、低的韧脆转变温度和一定的伸长率在海工方面获得广泛应用，尤其是应用在钻井平台的一些重要结构中。由于ABS标准中对EQ系列（如EQ51）超高强度钢只规定了C、Mn、Si、S、P、N元素的化学成分，其他微合金元素没有具体规定，这就导致各钢厂生产的EQ系列钢化学成分有差异，钢的焊接性存在差别，反映在力学性能上主要是抗拉强度及冲击韧性不同。

在CJ46—X100—D自升式钻井平台的升降装置、悬臂梁等重要结构中用到了大量的12~60mm厚的EQ51钢板，如果不加区分将这些钢用于平台，就会存在安全隐患。本文通过对国内5家主要钢厂（以下分别用字母ABCDE表示）生产的EQ51钢板分别进行系列焊接试验，客观分析各钢厂生产的EQ51钢板焊接

性的差异，全面了解掌握国内生产的EQ51超高强钢的焊接等技术质量情况，为公司EQ51钢板的采购订货提供技术支持。

## 2. 试验条件

（1）试验组别 本试验根据不同钢厂和不同厚度的母材分为8组，具体如表1所示。

（2）母材 采用规格为12mm/25mm/30mm×180mm×1 000mm的EQ51钢板，ABS标准对力学性能要求为屈服强度≥500MPa，抗拉强度610~770MPa，伸长率≥16%，-40℃冲击吸收吸收能量≥50J。

（3）焊接方法 埋弧焊（SAW），反面清根。

（4）试验焊材 采用伊萨OK Autrod 12.34（焊丝）+OK Flux 10.62（焊剂），焊丝表面需无锈，焊剂焊前需进行300℃×2~4h烘焙处理。

（5）坡口设计 12mm厚度母材采用I形坡口，25mm/30mm厚度母材采用（60°±5°）Y形坡口。

（6）预热温度 板厚为12mm时预热10℃，板厚为25mm/30mm时预热65℃。

（7）层间温度 预热温度

表1 试样组别

| 钢厂  | 试样组别        | 母材厚度/mm |
|-----|-------------|---------|
| A钢厂 | A-01        | 12      |
|     | A-02        | 25      |
|     | A-03（三次改进后） | 12      |
| B钢厂 | B-01        | 12      |
|     | B-02        | 30      |
| C钢厂 | C-01        | 12      |
| D钢厂 | D-01        | 12      |
| E钢厂 | E-01        | 12      |

~200℃。

(8) 焊接环境 车间。

(9) 焊接参数 具体焊接参数如表2所示。

3. 各钢厂试验结果及分析

按照AWS D1.1要求进行试验，各组试验焊缝焊完48h后经NDT检测（VT+MT+UT）都合格，考虑试验目的主要与焊接抗拉强度、塑性及冲击韧性相关，故主要以拉伸试验、弯曲试验和冲击试验结果数据作为分析依据，具体如下。

拉伸试验：每组制取两个横向拉伸试样进行试验。

冲击试验：12mm厚度试板每组取5个位置横向冲击试样，25mm/35mm厚度试板每组取6个位置横向冲击试样，其中1个位置为根部焊缝中心处，且每个位置取3个试样进行冲击试验。

冷弯试验：每组制取4个试样进行试验，弯头直径50.8mm，弯曲角度180°，试样规格为10mm×25mm×240mm，要求单个裂纹长度≤3mm，且1~3mm的裂纹长度之和≤10mm。

A钢厂EQ51焊接试验结果如表3所示。其中12mm厚的EQ51钢板经过三次的化学成分和热处理工艺调整，该厚度钢板的焊接性能有所改善，试验数据如表4所示。B、C、D、E钢厂EQ51焊接试验结果如表5~表8所示。

按照AWS D1.1标准要求，从以上试验数据分析可知：

(1) 对12mm较薄板而言，A钢厂改进前和C~D钢厂12mm厚度EQ51钢板焊评，虽然抗拉强度值和弯曲试验都满足标准要

表2 焊接参数

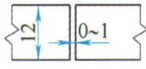
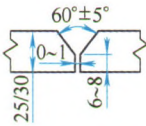
| 焊道  | 母材厚度/mm | 焊材规格<br>φ/mm | 焊接电流/A  | 电弧电压/V | 焊接速度/cm·min <sup>-1</sup> | 接头形式                                                                                |
|-----|---------|--------------|---------|--------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1~n | 12      | 4.0          | 550~650 | 28~34  | 40~60                     |  |
| 1~n | 25/30   | 4.0          | 550~650 | 28~34  | 40~60                     |  |

表3 A钢厂EQ51焊接试验结果

| 试验编号             | 拉伸试验<br>/MPa<br>(≥610MPa) | 弯曲<br>试验 | 冲击吸收能量/J<br>(10mm×10mm×55mm, -40℃, ≥33J) |      |      |      | 结论            |
|------------------|---------------------------|----------|------------------------------------------|------|------|------|---------------|
|                  |                           |          | 位置                                       | 单值   |      | 均值   |               |
| A-01<br>(t=12mm) | 659<br>674                | 合格       | WCL                                      | 115  | 120  | 140  | 不合格<br>(冲击值低) |
|                  |                           |          | FL                                       | 85.0 | 40.0 | 25.0 |               |
|                  |                           |          | FL+1                                     | 80.0 | 35.0 | 180  |               |
|                  |                           |          | FL+2                                     | 30.0 | 25.0 | 30.0 |               |
|                  |                           |          | FL+5                                     | 260  | 280  | 260  |               |
| A-02<br>(t=25mm) | 655<br>655                | 合格       | WCL/根                                    | 140  | 150  | 130  | 合格            |
|                  |                           |          | WCL/面                                    | 180  | 150  | 130  |               |
|                  |                           |          | FL                                       | 75.0 | 200  | 70.0 |               |
|                  |                           |          | FL+1                                     | 200  | 260  | 260  |               |
|                  |                           |          | FL+2                                     | 230  | 250  | 250  |               |
|                  |                           |          | FL+5                                     | 280  | 300  | 290  |               |

表 4

| 试验编号                      | 拉伸试验<br>/MPa<br>(≥610MPa) | 弯曲<br>试验 | 冲击吸收能量/J<br>(10mm×10mm×55mm, -40℃, ≥33J) |      |      |      | 结论 |
|---------------------------|---------------------------|----------|------------------------------------------|------|------|------|----|
|                           |                           |          | 位置                                       | 单值   |      | 均值   |    |
| A-03<br>(t=12mm<br>三次调整后) | 618<br>632                | 合格       | WCL                                      | 72.0 | 58.0 | 54.0 | 合格 |
|                           |                           |          | FL                                       | 171  | 83.0 | 135  |    |
|                           |                           |          | FL+1                                     | 148  | 133  | 107  |    |
|                           |                           |          | FL+2                                     | 295  | 372  | 195  |    |
|                           |                           |          | FL+5                                     | 385  | 380  | 390  |    |

表5 B钢厂EQ51焊接试验结果

| 试验编号             | 拉伸试验<br>/MPa<br>(≥610MPa) | 弯曲<br>试验 | 冲击吸收能量/J<br>(10mm×10mm×55mm, -40℃, ≥33J) |      |      |      | 结论            |
|------------------|---------------------------|----------|------------------------------------------|------|------|------|---------------|
|                  |                           |          | 位置                                       | 单值   |      | 均值   |               |
| B-01<br>(t=12mm) | 652<br>672                | 合格       | WCL                                      | 30.0 | 40.0 | 35.0 | 不合格<br>(冲击值低) |
|                  |                           |          | FL                                       | 20.0 | 20.0 | 10.0 |               |
|                  |                           |          | FL+1                                     | 130  | 155  | 120  |               |
|                  |                           |          | FL+2                                     | 160  | 140  | 150  |               |
|                  |                           |          | FL+5                                     | 215  | 210  | 210  |               |
| B-02<br>(t=30mm) | 692<br>670                | 合格       | WCL/根                                    | 170  | 180  | 180  | 合格            |
|                  |                           |          | WCL/面                                    | 190  | 120  | 190  |               |
|                  |                           |          | FL                                       | 75.0 | 160  | 60.0 |               |
|                  |                           |          | FL+1                                     | 210  | 90.0 | 190  |               |
|                  |                           |          | FL+2                                     | 250  | 220  | 230  |               |
|                  |                           |          | FL+5                                     | 270  | 290  | 280  |               |

表6 C钢厂EQ51焊接试验结果

| 试验编号             | 拉伸试验<br>/MPa<br>(≥610MPa) | 弯曲<br>试验 | 冲击吸收能量/J<br>(10mm×10mm×55mm, -40℃, ≥33J) |      |      |      | 结论            |
|------------------|---------------------------|----------|------------------------------------------|------|------|------|---------------|
|                  |                           |          | 位置                                       | 单值   |      | 均值   |               |
| C-01<br>(t=12mm) | 681<br>713                | 合格       | WCL                                      | 40.0 | 70.0 | 55.0 | 不合格<br>(冲击值低) |
|                  |                           |          | FL                                       | 30.0 | 30.0 | 30.0 |               |
|                  |                           |          | FL+1                                     | 30.0 | 25.0 | 30.0 |               |
|                  |                           |          | FL+2                                     | 30.0 | 28.0 | 25.0 |               |
|                  |                           |          | FL+5                                     | 15.0 | 40.0 | 20.0 |               |

表7 D钢厂EQ51焊接试验结果

| 试验编号             | 拉伸试验<br>/MPa<br>(≥610MPa) | 弯曲<br>试验 | 冲击吸收能量/J<br>(10mm×10mm×55mm, -40℃, ≥33J) |      |      |      | 结论            |
|------------------|---------------------------|----------|------------------------------------------|------|------|------|---------------|
|                  |                           |          | 位置                                       | 单值   |      | 均值   |               |
| D-01<br>(t=12mm) | 684<br>684                | 合格       | WCL                                      | 32.0 | 30.0 | 35.0 | 不合格<br>(冲击值低) |
|                  |                           |          | FL                                       | 36.0 | 40.0 | 41.0 |               |
|                  |                           |          | FL+1                                     | 30.0 | 34.0 | 25.0 |               |
|                  |                           |          | FL+2                                     | 66.0 | 37.0 | 61.0 |               |
|                  |                           |          | FL+5                                     | 270  | 273  | 295  |               |

表8 E钢厂EQ51焊接试验结果

| 试验编号             | 拉伸试验<br>/MPa<br>(≥610MPa) | 弯曲<br>试验 | 冲击吸收能量/J<br>(10mm×10mm×55mm, -40℃, ≥33J) |     |     |     | 结论 |
|------------------|---------------------------|----------|------------------------------------------|-----|-----|-----|----|
|                  |                           |          | 位置                                       | 单值  |     | 均值  |    |
| E-01<br>(t=12mm) | 610<br>621                | 合格       | WCL                                      | 155 | 145 | 130 | 合格 |
|                  |                           |          | FL                                       | 80  | 95  | 45  |    |
|                  |                           |          | FL+1                                     | 40  | 65  | 110 |    |
|                  |                           |          | FL+2                                     | 55  | 55  | 60  |    |
|                  |                           |          | FL+5                                     | 50  | 35  | 170 |    |

求,但各组部分冲击值比较低,冲击韧性不能满足标准要求,各个钢厂的冲击韧性值差异较大。A钢厂改进前主要集中在FL+2位置处冲击值低,B钢厂主要集中在FL位置处,且冲击值非常低,C钢厂在FL、FL+1、FL+2及

FL+5处的冲击值都低,D钢厂主要在WCL和FL+1处冲击值低。A钢厂经过三次改进后的12mm厚度EQ51钢板力学性能试验能满足标准要求,而且最低冲击单值高出标准要求达63%;E钢厂的12mm厚度EQ51钢板焊接性能试

验也能满足标准要求。

(2)对中厚板而言,A钢厂25mm厚与B钢厂30mm厚度EQ51钢板力学性能试验都合格,冲击值较高,抗拉强度也比较稳定,并且弯曲试验也没有发现裂纹。

(3)就EQ51这种钢而言,随着厚度变小,焊接热影响区冲击韧性降低,焊接性变差,这一试验结果与AWS D1.1第4部分关于焊接评定板厚向下覆盖的要求一致。AWS D1.1认为,当考虑焊接接头冲击韧性时,板厚向下覆盖到试验板厚T或16mm,取其中较小的值,板厚T<6mm的情况除外,这种情况覆盖的最小厚度为3mm。所以,16mm以下EQ51板的焊接性要引起重视。

4. 结语

国内这5家钢厂生产的EQ51中厚板焊接性能差异不大,基本都能满足海工生产上的要求,但12mm较薄板焊接性差异较大,只有少数能满足要求,船厂在选择16mm以下厚度EQ51板时应慎重;同时,建议船级社在进行工厂认可时,加强对16mm厚度以下EQ51板焊接性试验评定。

作者简介:高宗让等,招商局重工(深圳)有限公司

MW 20170420

《金属加工(热加工)》2017年第10期广告目次

|                 |      |     |                 |      |      |
|-----------------|------|-----|-----------------|------|------|
| 山东奥太电气有限公司      | 1562 | 封面A | 北京金威焊材有限公司      | 1161 | 前彩6  |
| 梅塞尔切割焊接(中国)有限公司 | 1126 | 封二A | 中国机械工程学会-北京埃森焊接 |      |      |
| 昆山京群焊材科技有限公司    | 5123 | 封面B | 与切割展览会组委会       | 1380 | 前彩7  |
| 昆山日皓焊切器材有限公司    | 1673 | 封二B | 威特仕焊接(深圳)有限公司   | 2538 | 前彩8  |
| 伊达新技术电源(昆山)有限公司 | 1925 | 封三  | 金属加工杂志社         | 8000 | I    |
| 深圳市瑞凌实业股份有限公司   | 1254 | 封底  | 凯天环保科技股份有限公司    | 5028 | III  |
| 法国液化空气焊接公司上海代表处 | 1404 | 前彩1 | 易格斯拖链轴承仓储贸易(上海) |      |      |
| 泰佰亿(山东)工业有限公司   | 5032 | 前彩2 | 有限公司            | 1298 | V    |
| 北京时代科技股份有限公司    | 1258 | 前彩3 | 金属加工APP         | 8000 | 分隔页A |
| 浩亭(珠海)贸易有限公司    | 5312 | 前彩4 | 天津三英焊业股份有限公司    | 1275 | 分隔页B |
| 南通振康焊接机电有限公司    | 1362 | 前彩5 |                 |      |      |