

## 6 结 论

(1) TCS 不锈钢原始试件焊态的疲劳强度( $2 \times 10^6$ ) $\sigma_{max}$  为 170 MPa; 超声冲击处理焊接接头的疲劳强度( $2 \times 10^6$ ) $\sigma_{max}$  为 272 MPa, 提高幅度为 60%, 效果显著。

(2) TCS 不锈钢焊态试样疲劳断裂于焊趾处, 超声冲击后, 试样疲劳断裂于母材。

(3) 可以推荐使用超声冲击方法对 TCS 不锈钢焊接接头进行处理, 以提高其疲劳性能。

**作者简介:** 李加良, 1956 年出生, 教授级高级工程师, 国际焊接工程师, 主要从事铁路货车制造工艺研究, 现任工厂技术专家, 享受政府特殊津贴, 连续担任中国焊接学会第六、第七届(2000~2007 年)理事会理事, 兼任湖南省焊接学会副理事长。

# D36 级高强度造船用钢板焊接性能的分析

首 钢 技 术 研 究 院(北京市 100041)  
首钢迁安钢铁有限责任公司(064404)      阳代军 陈延清 李 飞 张永青  
    张卫东 徐 彬

**摘要** 为了适应近年来世界造船工业对造船用钢的需求, 首钢迁安钢铁有限责任公司通过了九国船级社的认证。根据各国船级社的要求, 对 D36 级高强度造船用钢板的焊接性能进行了试验研究, 分析了试验用钢板焊接接头的力学性能、冲击性能、硬度以及显微组织。试验结果表明试验用钢板具有优良的焊接性能, 完全满足各船级社对船板的严格要求。

**关键词:** 高强船板用钢 焊接性能 显微组织

**中图分类号:** TG406

## 0 引 言

近年来中国造船业发展迅猛, 成为世界造船业的一个亮点, 据业内人士预测, 中国年造船产量将占世界份额的 25% 以上, 出口额 120 亿美元。目前, 中国的造船业手持订单与年产能力的比率已达到 4.3 倍, 造船厂家的销量和价格在未来 3~4 年内都已锁定, 这就决定了对船用钢板的需求强度不可能减弱, 而且将继续增长, 从而成为支撑国内船板市场走强走稳的主要动力。

随着造船产量的大幅增长, 以及船厂建造的船型不断增多, 未来造船用钢的发展趋势为: 低合金高强度钢的需求量将大幅度增加; 造船用钢的规格、尺寸精度将更高; 质量将进一步提高, 品种将增多。因此为了弥补厚板厂生产薄规格能力的不足, 首钢迁安钢铁有限责任公司根据 2250 热轧生产线特点, 提出了认可厚度

规格为 5~18 mm, 并通过了中国船级社(CCS)、美国船级社(ABS)、英国船级社(LR)、挪威船级社(DNV)、韩国船级社(KR)、法国船级社(BV)、日本船级社(NK)、德国船级社(GL)和意大利船级社(RINA)等九国船级社的认证。认可品种为一般强度级别(A、B、D)和高强度级别(A32、D32、A36、D36), 这为首钢 2250 热轧生产各级船板创造了条件。

为了考察 D36 级船板的焊接性能, 按照九国船级社的要求, 对首钢迁安钢铁有限责任公司 2250 热轧生产的 18 mm 厚 D36 级船板进行了焊接性能试验。

### 1 试验用钢的实物质量分析

#### 1.1 船规对 D36 级船板的要求

船规对 D36 级船板的性能要求如表 1 所示。

#### 1.2 试验用钢的化学成分和性能

试验用钢为首钢迁钢公司生产的 D36 级造船用钢, 厚度 × 宽度为 18 mm × 2 040 mm, 其化学成分、力学性能和冲击性能如表 2、表 3 和表 4 所示。从表中可

以看出该试验用钢具有低的碳当量和焊接裂纹敏感系数,且硫、磷含量低,因此该试验用钢具有良好的焊接性能。从性能上看,具有非常好的拉伸和冲击性能,而且横向和纵向的力学性能和冲击性能比较一致,-60℃时的冲击性能仍满足船规的要求。因此首钢迁安钢铁有限责任公司生产的D36级高强度造船用钢具有优良的性能。

表1 船规对D36级船板的要求

上屈服强度 $R_{\text{eff}}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	断后伸长率 $A/(\%)$	冲击吸收功 $A_{kv}(-20^\circ\text{C})/\text{J}$	纵向	横向
≥355	490~630	≥21	≥34		≥24

表2 试验用钢的化学成分

化学成分(质量分数,%)								碳当量 $C_{eq}/(\%)$	抗裂纹敏感系数 $P_{cm}/(\%)$
C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Fe		
0.12	0.22	1.30	0.011	0.003	0.0381	0.033	余量	0.34	0.20

表3 试验用钢的力学性能

方向	上屈服强度 $R_{\text{eff}}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	断后伸长率 $A/(\%)$	断面收缩率 $Z/(\%)$
横向	415	540	26.0	66.0
纵向	400	530	29.0	67.0

表4 试验用钢的冲击性能

试验温度 $T/^\circ\text{C}$	冲击吸收功 $A_{kv}/\text{J}$	
	横向	纵向
20	244	250
0	215	230
-20	179	183
-40	153	120
-60	45	46

## 2 焊接工艺

### 2.1 焊接试验要求

焊接性能是船体结构用钢的一项很重要的指标,焊接性能的好坏直接影响船体结构的安全性,因此为了考察D36级高强度船板对不同焊接热输入的适应性,进行了2个焊接参数试验,热输入分别为15 kJ/cm、50 kJ/cm,将两个18 mm×250 mm×1 000 mm钢板进行对接焊,焊缝分别垂直轧制方向和平行于轧制方向。焊丝和焊剂为CHW-S3/CHF101,焊丝直径为φ4.0 mm;选用埋弧焊,采用K形坡口,坡口角度为50°,如表5和

图1所示。

### 2.2 焊接工艺

将两块焊接样板平放进行焊接,两块焊接样板之间的间隙保持3~4 mm,焊条和焊剂在焊接前保持干燥,热输入量分别为15 kJ/cm和50 kJ/cm;采用埋弧焊;先从每个试件的一面焊起,每焊一道后,除去焊剂和熔渣,并将试件放置在静止空气中使焊缝冷却到250℃以下,但不低于100℃(温度在焊缝中心处的表面上测量),再焊下一道。每一焊道的厚度应不小于焊丝直径,至少为4 mm。焊完一面后,应对焊缝清根,直至显露无缺陷金属后,再焊接另一面,按上述要求直至焊完,如图1所示。焊接工艺参数如表6所示。

表5 焊接试验要求

焊接分类	焊缝方向	热输入 $(\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1})$	样坯尺寸 $\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$
	焊缝垂直于 横向焊接	15	18×250×1 000
纵向焊接	轧制方向	50	18×250×1 000
	焊缝平行于 纵向焊接	15	18×250×1 000
	轧制方向	50	18×250×1 000

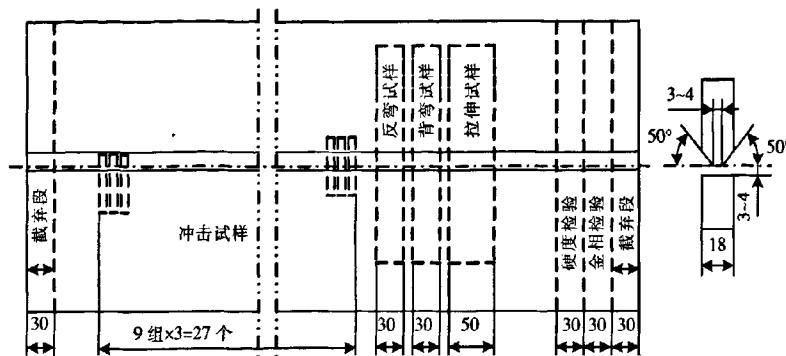


图1 焊接坡口和取样示意图

表6 焊接工艺参数

焊接方法	焊丝直径 $d/\text{mm}$	焊接电流 $I/\text{A}$	电弧电压 $U/\text{V}$	焊接热输入 $E/(\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1})$
SAW	4.0	550	30	15
				50

### 3 焊接性能分析

#### 3.1 焊接接头力学性能

按照图1的规定,在焊接板上取拉伸和弯曲试样,图2为焊接接头拉伸试样,图3为焊接接头冷弯试样,表7为D36级船板焊接接头横向和纵向拉伸冷弯试验结果。

试验结果均满足国家标准的要求。焊接热输入对焊接接头的强度影响不大,不同焊接热输入的试样具有一致的力学性能,试验结果表明材料的焊接接头具有良好的力学性能,且与母材的性能一致,拉伸断裂位置在母材部位,对焊接接头进行180°的正弯和背弯试验均未出现开裂,说明焊接接头具有良好的塑性。

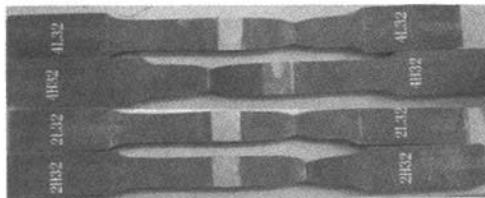


图2 焊接接头拉伸试样



图3 焊接接头冷弯试样

表7 横向焊接接头的力学性能

	热输入 $E/(\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1})$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	断裂位置	弯曲(180°)	
				正弯	背弯
横向	15	525	母材	合格	合格
	50	520	母材	合格	合格
纵向	15	525	母材	合格	合格
	50	530	母材	合格	合格

### 3.2 焊接接头冲击性能

按图 1 取冲击试样,取样位置为焊缝中心、熔合线、熔合线以外 1 mm、2 mm、3 mm、5 mm、7 mm、20 mm 和 30 mm 共 9 个位置,图 4 为船板焊接接头冲击试验结果。试验结果表明,焊缝和热影响区均具有良好的冲击性能,其冲击吸收功均大于或接近母材,而且冲击吸收功没有明显下降,熔合线附近冲击性能最低,不同的焊接热输入值,焊接接头的冲击性能基本一致。因此船板焊接接头具有良好的冲击性能。

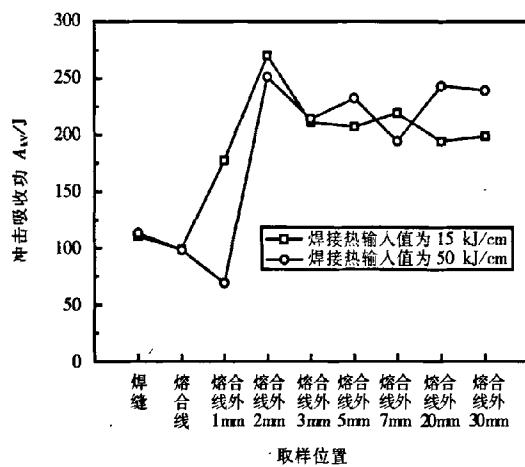
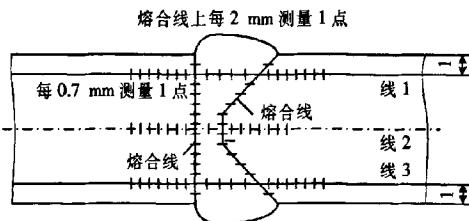


图 4 焊接接头冲击性能

### 3.3 焊接接头硬度试验

图 5 为硬度测点示意图,图 6 为 D36 级船板焊接接头硬度测试结果,硬度值在  $146 \sim 201 \text{ HV}_5$  之间。焊缝的硬度高于母材,随着测试点远离焊缝中心,硬度值逐渐下降,直到接近母材的硬度。熔合线上的硬度值



钢板厚度方向平行于钢板表面的三条线 1、2、3。1、3 线分别距上下表面 1 mm,2 线在厚度方向中间位置。从熔合线到热影响区每隔 0.7 mm 测量一点,至少测量 6~7 点,熔合线上每 2 mm 测量一点,熔合线之间的 1、2、3 线上每 2 mm 测量一点。

图 5 硬度测点示意图

比较均匀,上下表面附近的硬度值也比较一致,钢板中心的硬度值较表面稍低。

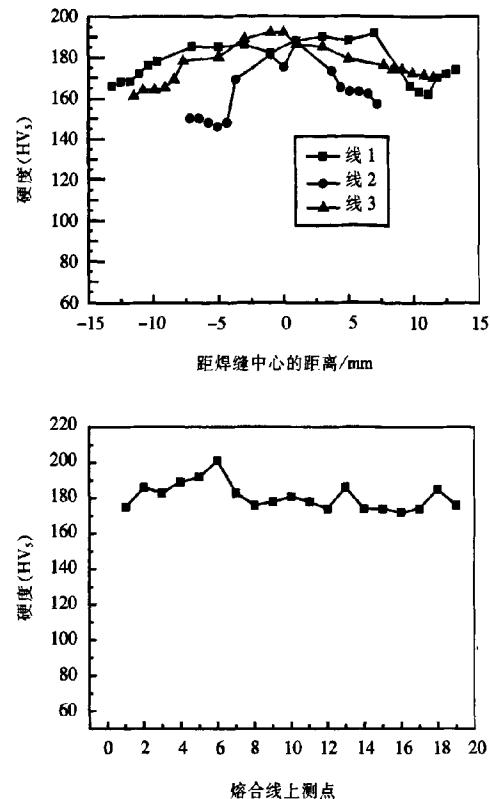


图 6 D36 级船板焊接接头硬度分布

### 3.4 金相检验

焊接接头不同部位的显微组织如表 8 和图 7 所示。

表 8 船板焊接接头显微组织

位置	组织
焊缝	柱状晶
熔合线	粗大魏氏组织 + 铁素体
过热区	魏氏组织 + 铁素体
正火区	细小等轴铁素体 + 珠光体
不完全重结晶区	铁素体 + 粒状珠光体
母材	铁素体 + 珠光体

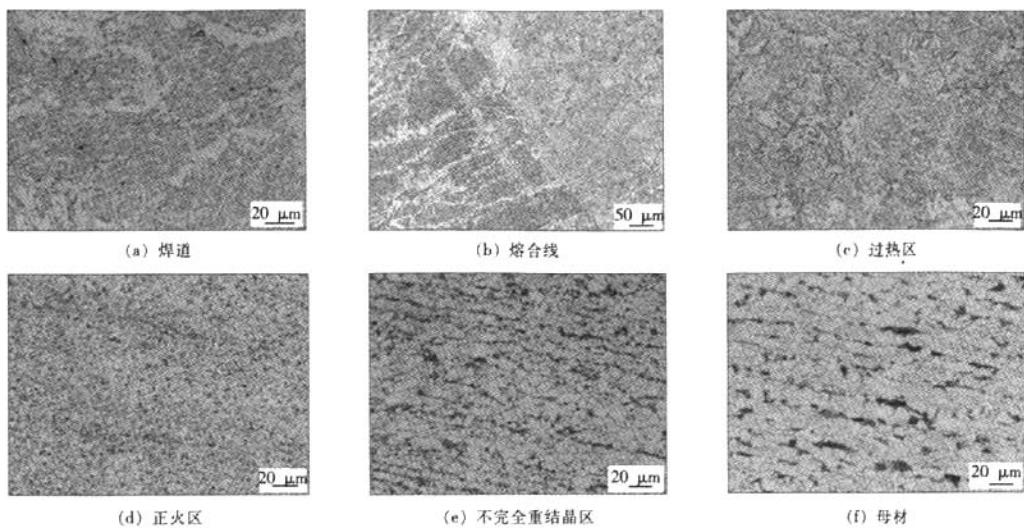


图 7 D36 级船板焊接接头显微组织

#### 4 结 论

首钢迁安钢铁有限责任公司开发的 D36 级造船用钢具有良好的焊接性能,且两种焊接热输入焊接的 D36 级船板性能基本一致,完全满足各船级社对船板焊接性能的要求。

#### 参 考 文 献

- [1] GB712—2000, 船体用结构钢[S].
- [2] 吕德林, 李砚珠. 焊接金相分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

作者简介: 阳代军, 1968 年出生, 博士, 高级工程师。

#### 最新 ISO 焊接标准资讯

《ISO 焊接标准化文集》(中文版)于 2006 年 12 月出版。该文集会聚了 ISO 焊接标准化领域近年来的一系列热点主题,如焊接标准化发展战略、焊接质量保证、焊接人员的资质要求、焊接工艺规程和评定、焊接材料、焊接试验和检验等。

整套文集包含 78 篇焊接标准化文献(包括 ISO 工作文件、ISO 标准和技术报告),集中反映了最近几年 ISO 焊接标准化的发展动态。该文集为中国焊接行业跟踪、了解和掌握 ISO 焊接标准提供了捷径,也将进一步促进中国焊接领域的国际接轨。

该文集系内部发行资料,现尚有少量剩余,需要者可与秘书处联系。

联系地址: 哈尔滨市和兴路 111 号(邮编:150080)

全国焊接标准化技术委员会秘书处 刘雅芳

电 话: 0451 - 86326763

传 真: 0451 - 86325871

电子邮箱: parkdg2004@yahoo.com.cn

开 户 行: 工商行哈尔滨市和兴支行

帐 号: 3500042109008935051

户 名: 机械科学研究院哈尔滨焊接研究所

价 格: ¥300.00 元整(含邮资在内)