

# 船体结构用钢认证工艺控制实践

周松明, 汪 晔, 王小燕, 王孝东

宝武集团鄂城钢铁有限公司, 湖北 鄂州

收稿日期: 2022年2月15日; 录用日期: 2022年3月11日; 发布日期: 2022年3月18日

## 摘 要

分析了130吨转炉生产船体用结构钢时各工序的控制要点, 指出船体用结构钢生产控制的关键因素: 成分设计、低磷低氮冶炼技术、夹杂物形态控制、微合金化元素的合理利用、连铸机参数的合理配置以及控冷控轧技术。实践证明, 采用该工艺生产的船体用结构钢完全符合船级社的认证要求。

## 关键词

船体用钢, 因素, 成分设计, 认证

# Practice of Certification Process Control for Hull Structural Steel

Songming Zhou, Xian Wang, Xiaoyan Wang, Xiaodong Wang

Baowu Group Echeng Iron & Steel Co., Ltd., Ezhou Hubei

Received: Feb. 15<sup>th</sup>, 2022; accepted: Mar. 11<sup>th</sup>, 2022; published: Mar. 18<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The control points of various processes in the production of hull structural steel by 130 ton converter are analyzed, and the key factors of production control of hull structural steel are pointed out: composition design, low phosphorus and low nitrogen smelting technology, inclusion shape control, rational utilization of microalloying elements, rational configuration of caster parameters and controlled cooling and rolling technology. Practice has proved that the hull structural steel produced by this process fully meets the certification requirements of the classification society.

## Keywords

Hull Steel, Factor, Composition Design, Authentication

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

船体结构用钢(以下简称“船板”),指按船级社建造规范要求生产的用于制造船体结构的钢材。船板主要用于船舶和海上油气钻采平台。因其特殊的使用环境,要求钢材除了具有较高的强度外,还要具有良好的韧性、抗疲劳性、耐海水腐蚀性、抗层状撕裂性、焊接性、冷热加工性。

宝武集团鄂城钢铁有限公司(以下简称“鄂钢”)船板认证体系中涉及的船板级别包括一般强度结构钢 B、D、E 级和高强度结构钢 DH36、EH36 级船板。完成认证的船级社有中国(CCS)、德国(GL)、法国(BV)、挪威(DNV)、英国(LR)等多家船级社。船板钢认证是鄂钢产品认证工作开展以来,工作难度最大、技术含量最高、实物准备最繁琐、机械试验最多的产品认证之一。

## 2. 生产工艺总体设计思路

### 2.1. 产品的性能要求

船板除要求具有较高强度外,还必须有良好的低温冲击韧性、焊接性能和抗冷弯性。因此,“低碳、高锰、微合金化”的化学成分设计思路是当今许多生产厂家所采用的[1] [2] [3]。同时,还需要通过优化控轧控冷工艺进一步提高船板的强韧性。

### 2.2. 成分设计原则

#### 2.2.1. 五大元素控制要求

从船板强度方面考虑,C、Mn 是提高强度的主要元素,Mn 作为常用的固溶强化元素,大部分固溶于铁素体,可以提高抗拉强度和屈服强度,还可以增大奥氏体过冷能力,具有轻微细化铁素体晶粒的作用;从焊接性能和韧性方面考虑又需要控制较低的碳当量和 C 含量,同时碳含量的下限值又不能设置太低,以防止钢水在冶炼过程中过氧化,一般设计考虑 C 含量需大于 0.10%。另外,C 与 Mn 高易产生偏析。综合考虑,C、Mn 含量应控制在适宜范围。

Si 在钢中几乎全部溶于铁素体,可显著提高抗拉强度和屈服强度,但是 Si 控制过高会降低钢板的焊接性能和延伸率。因此,一般将 Si 控制在 0.30% 以下。

S、P 是常见的有害元素,钢中的 S、P 及气体含量直接影响钢的塑性和韧性以及易产生偏析。若 S、P 含量较高,会影响轧制工艺的制定,不利于控轧的进行,因此应最大限度地降低 S、P 含量。

#### 2.2.2. N、O、H 的控制

对于 N 的控制比较困难,主要手段为转炉冶炼前期去 N、控制使用含 N 原材料以及避免钢水与空气的直接接触而产生增 N。RH 炉虽有良好的脱气功能,但脱 N 能力很有限。

对于 O 的控制,主要手段为在 LF 炉精炼炉加入 Al 丸(线)、铝渣脱氧剂等,完成沉淀、扩散脱氧,其次利用 RH 的脱气能力进一步去除钢中的 O。

对于 H 的控制,一是要控制原材料水分带入,二是利用 RH 的脱气能力有效去 H。统计表明,鄂钢转炉钢水经 RH 炉处理后,可将 H 含量控制在 1.5 ppm 以下。

#### 2.2.3. 微合金化元素的选择和控制

常见的微合金元素有 Nb、Ti、V,均能通过细化晶粒和沉淀强化作用,提高钢的力学性能。从细化

铁素体晶粒的效果看,  $Nb > Ti > V$ 。研究表明, Nb 较 Ti, V 更能显著提高奥氏体的再结晶终止温度, 扩大奥氏体未结晶区, 通过控轧使铁素体晶粒细化, 从而改善钢的综合力学性能。

对于高级别船板, 可在钢中添加 Ni, 主要目的是提高钢的低温冲击韧性和塑性, 并能够阻止奥氏体向珠光体或马氏体转变, 有利于奥氏体残留。

根据微量元素的作用, 最终确定在 EH36 级船板中添加微合金元素 Nb 完成细化晶粒作用, 添加合金元素 Ni, 以提高其低温冲击韧性和塑性。

#### 2.2.4. Ca 处理

通过对钢水进行 Ca 处理, 并控制钢液中  $w(Ca)/w(Al) > 0.1$ , 可以使不规则的氧化铝夹杂变为液态球形夹杂  $12 CaO \cdot 7 Al_2O_3$ 。同时随着 Ca 的加入, 钢水凝固过程能避免生成长条状的 MnS 夹杂, 而生成球状的 CaS, 改善了钢的各向异性[4]。

### 2.3. 成分设计

根据船板入级的规定, 采用相似的成分设计、相同的制造方法、相同的交货状态的材料, 经船级社同意可选取具有代表性的材料以高代低, 因此鄂钢选择 EH36 作为高强度船板认证的代表性材料。根据船级社规范的要求, 并结合国家标准 GB 712-2011, 确定 EH36 级船板的熔炼成分见表 1, 其力学性能要求见表 2。

Table 1. Chemical composition of class EH36 hull structural steel

表 1. EH36 级船板的化学成分

质量级别	标准	化学成分/wt%							
		C	Mn	Si	S	P	Als	Nb	Ni
EH36	GB712	≤0.18	0.9~1.60	≤0.50	≤0.035	≤0.025	≥0.015	0.020~0.050	≤0.40
	熔炼成分	0.10~0.16	1.30~1.50	≤0.30	≤0.005	≤0.020	0.015~0.050	0.020~0.050	0.10~0.40

注: 要求残余元素  $Cr \leq 0.20\%$ 、 $Mo \leq 0.08\%$ 、 $Cu \leq 0.30\%$ 。要求气体元素  $N \leq 0.0050\%$ 、 $O \leq 0.0030\%$ 、 $H \leq 0.00018\%$ 。

Table 2. Requirements for mechanical properties of hull structural steel

表 2. 船板力学性能要求

质量级别	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
EH36	≥355	490~630	≥21

### 2.4. 船板生产工艺流程

铁水预处理 → 130 t 转炉 → LF 钢包炉 → RH 真空炉(Ca 处理) → 板坯连铸 → 加热 → 轧制 → 精整

## 3. 冶炼过程关键工艺及主要措施

### 3.1. 低 P 冶炼技术

转炉模拟双联法操作, 脱 P 期供氧强度为  $0.8 \sim 1.2 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$ , 高枪位操作保证良好的化渣、抑制碳氧化及控制熔池升温速度, 脱 P 期温度控制在  $1460^\circ\text{C}$  以内, 处理时间约 9 min, 低温脱 P 期脱 P 效率可达 85%, 脱 P 结束后快速化渣升温, 转炉冶炼周期控制在 22 min 内。终点 P 可控制在 0.012% 以内。

### 3.2. 低 N 冶炼技术

N 虽然能够与微合金元素 Nb 形成 Nb(C、N) 产生强化作用, 但过高的 N 含量对于船板钢是有害的。

转炉兑铁冶炼至钢水经精炼到连铸浇铸, 钢中的 N 含量会逐渐增高。要控制钢中 N 含量, 分析了钢中 N 的来源及 N 在转炉冶炼中的变化规律, 核心是降低钢水终点 N 含量。通过使用低 N 废钢、合金, 限制出钢温度  $\leq 1630^{\circ}\text{C}$ , 避免终点过氧化及后吹, 终点 N 含量可控制在  $\leq 38$  ppm, 达到了低 N 冶炼的控制目标。

### 3.3. 二次精炼工艺

LF 采用  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  三元渣系, 渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量控制在 20%~30% 的范围, 能够促进化渣, 进行快速造渣。另外, 富含的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  还原渣有疏松和泡沫特性, 反应面积大, 可提高渣中的 O 离子活度。通过加入 Al 丸、铝渣脱氧剂等完成扩散脱氧。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  富含的还原渣中, 铝酸钙熔点低, 对钢液的粘附力大, 迅速从钢液中浮出; 且 CaS 能很好地润湿铝酸钙, 并一起浮出钢液, 从而降低钢中夹杂物含量。在造渣过程中遵循“快、白、稳”的原则, 并配合合理的吹氩搅拌工艺。在精炼后期, 利用其良好的动力学及热力学条件完成钢水的深脱 S, 精炼结束 S 含量可降至 0.004% 以下。

以下是精炼末期炉渣成分及 LF 出站前钢水自由氧含量, 见表 3。

**Table 3.** Slag composition and oxygen content at the end of LF refining

**表 3.** LF 炉精炼末期渣成分及氧含量

项目	FeO/%	MnO/%	CaO/%	SiO <sub>2</sub> /%	MgO/%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	定氧/ppm
范围值	0.5~0.89	0.5~1.1	42.6~55.8	6.7~15.1	7.1~9.8	24.3~35.2	2.1~6.9
平均值	0.64	0.9	51.7	7.6	7.6	28.5	3.6

对于 EH36 级船板, LF 处理结束后需进行 RH 炉真空处理, 进一步提高其纯净度。目的在于使钢质纵向和横向机械性能均匀, 提高其延伸率、断面收缩率和冲击韧性。高强度船板 EH36 级在真空处理时还需进行微 Ti 处理, 进一步提高其深冲性能。

考虑到生产节奏的控制, RH 炉真空周期一般在 40 min 以内, 极限真空度设计为  $<67$  Pa, 且极限真空保持时间在 10~15 min。为保证处理效果, Al 丸及 Ti 合金加入时机, 净循环时间, 最佳循环流量的控制是关键。经循环处理后, 钢中的 [H] 可降到 1.5 ppm 以下, 钢中 [O] 可降至 25 ppm 以下。统计分析发现, 最终 H 含量近似地与处理时间成直线关系, 因此, 如果适当延长循环时间, H 含量还可以进一步降低。

### 3.4. Ca 处理及夹杂物控制

钢中加入钙量应该控制在生成 C12A7 和 C3A 之间的区间, 相关研究资料表明, 铝镇静钢进行钙处理, 要求  $[\text{Ca}]/[\text{Al}]$  为 0.09~0.14, 是达到对夹杂物充分改质变性的基本条件。船板钢中 [Al] 控制在 0.025% 左右, 为达到  $[\text{Ca}]/[\text{Al}]$  为 0.09~0.14, 需将钢种 [Ca] 控制在 0.002%~0.004% 之间, 喂入钙线后保证软吹时间  $\geq 12$  min, 促进夹杂物进一步上浮。

### 3.5. 连铸参数配置

钢水采用二次精炼工艺, 钢水纯净度可以得到保证, 船板钢连铸工艺关注重点为铸坯表面质量, 为有效控制纵裂发生, 开浇炉拉速比较重要, 据有关资料介绍: 高的浇注速度将促进裂纹形成。统计数据表明, 其主要原因是拉速升高以后保护渣的消耗量减少, 导致坯壳润滑不良, 造成铸坯表面纵向裂纹。对于船板钢生产, 为弥补开浇炉保护渣熔化速度慢而导致消耗量不足的问题, 实行了开浇炉降速操作(即开浇炉拉速低于典型拉速), 提高保护渣消耗量。经过降速操作, 连铸板坯表面纵裂发生率维持在较低值。

为控制铸坯边部裂纹, 主要采取以下措施:

- 1) 合理分配二冷水分布, 在铸坯矫直前对板坯角部实行弱冷, 可以减少铸坯的角裂的发生。

2) 在板坯连铸机浇钢过程中, 二冷配水变化的迟缓效应导致降拉速时铸坯强冷, 铸坯产生角裂的几率增加。

3) 优化铸坯断面设计, 控制轧制宽展比可减少板坯角部裂纹向钢板宽面扩展。

中包覆盖剂选用含 MgO 的碱性覆盖剂。EH36 级船板选择中碳钢保护渣。中间包内留钢 8~10 t 停浇来控制中间包下渣。

### 3.6. 控轧控冷

在加热炉中均热温度控制在 1200℃~1240℃, 加热时间 3~4.5 h。粗轧采用高温高压下量轧制, 板坯轧制至最终成品厚度的 2.5~4 倍, 开轧温度控制在 1050℃~1100℃范围, 累计压下率 > 60%。精轧开轧温度 ≤ 900℃, 累计压下率 > 40%, 终冷温度控制在 650℃~780℃。经控冷后, 可获得均匀的细晶粒组织, 保证优良的力学性能[5]。

## 4. 实践应用效果

### 4.1. 钢水纯净度

通过中包取样, 做 N、O、H、P、S 成分全分析, EH36 级船板控制情况见表 4。

Table 4. Total analysis of N, O, H, P and S components

表 4. N、O、H、P、S 成分全分析

质量级别	各元素含量范围值/ppm				
	N	O	H	S	P
EH36	25~40	13~23	0.8~1.5	20~40	50~120

### 4.2. 力学性能

对成品取样分析后, EH36 级船板强度和延伸率见表 5, 其纵向冲击功见表 6。

Table 5. Mechanical properties of high-strength hull structural steel

表 5. 高强度船板力学性能

质量级别	横向拉伸(轧材厚度 50 mm)		
	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
EH36	≥360	520~560	≥25

Table 6. Longitudinal impact test of high-strength hull structural steel head (thickness 50 mm)

表 6. 高强度船板头部纵向冲击试验(厚度 50 mm)

质量级别	纵向冲击功/J		
	-60℃	-40℃	-20℃
EH36	191, 216, 214	210, 229, 222	257, 251, 265

### 4.3. 无损探伤及落锤试验

经无损探伤检验, 轧材探伤合格率 100%, 钢质纯净度控制得比较好。

落锤试验是船板认证试验项目中的一项重要内容, 要求测出船板的无塑性转变温度, 即 NDT 温度, 它是船板的主要韧性指标之一, 同时也是其诸多性能指标中较难满足的一项。经检验, 高强度船板 EH36

级落锤试验中 NDT 温度 $-55^{\circ}\text{C}$ ，落锤试验检测合格。

## 5. 结论

1) 鄂钢船板认证工艺经产品性能检测完全满足船板认证要求，生产工艺实践可用于实际船板生产。

2) 合理的成分设计及冶炼过程钢水纯净度的控制是关键，将钢中 P、S、O、N、H 总量控制在较低水平，不仅是钢质纯净度的保证，也可有效控制铸坯偏析带的形成。并通过合适的 Ca 处理工艺可有效控制脱氧夹杂物的形态，提高产品质量。

3) 合理的连铸工艺是钢坯表面质量的保证。通过开浇炉限制拉速及合理的二冷工艺，铸坯纵裂发生率及边裂发生率均控制在较低水平。

## 参考文献

- [1] 陈妍, 等. 国内外高强度船板钢的研发现状和发展[J]. 特殊钢, 2011, 32(5): 326-330.
- [2] 韩炯, 高亮. 高强度船板钢拉伸试验断口分层的原因分析[J]. 宽厚板, 2006, 12(1): 30-33.
- [3] 侯登义. 美标 A 级船体用结构钢的生产实践[J]. 河南冶金, 2007, 15(1): 338-347.
- [4] 程林, 等. “BOF $\rightarrow$ LF $\rightarrow$ RH $\rightarrow$ 钙处理 $\rightarrow$ CC”工艺生产管线钢过程夹杂物演变[J]. 炼钢, 2019, 35(6): 360-366.
- [5] 程澍勋. E36 船板钢成分设计及其大线能量焊接性能研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2012.