

# 390 MPa 级大线能量焊接海洋平台用钢板研发

姜秉坤<sup>1</sup>, 杨雄<sup>2</sup>

1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司稀土钢板材厂, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 采用低 C、高 Mn、Nb - Ti 微合金化的成分体系, 冶炼时采取合理的合金加入顺序, 并采用控轧控冷工艺, 获得了一种 390 MPa 级的海洋平台用试验钢。试验结果表明: 试验钢的上屈服强度为 488 MPa, 抗拉强度为 550 MPa, 断后伸长率为 30%, -20 °C 纵向冲击功为 242 J, 横向冲击功 155 J; 显微组织为细小的铁素体和珠光体, 夹杂物细小, 尺寸为 2 ~ 3 μm; 试验钢进行焊接线能量为 100 kJ/cm 的焊接热模拟试验后, 力学性能检测及金相组织具备了大线能量焊接用钢的基本特征, 验证了产品具有良好的低温冲击韧性及焊接性能。

**关键词:** 海洋平台用钢; 低温冲击; 焊接热模拟

中图分类号: TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438(2023)02 - 0015 - 05

## Research and Development of 390 MPa Grade Steel Plate for Offshore Platform with Large Heat Input Welding

Jiang Bing - kun<sup>1</sup>, Yang Xiong<sup>2</sup>

1. Rare Earth Steel Plate Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** In this paper, the 390 MPa grade test steel for offshore platform is obtained with the component system of low C, high Mn and Nb - Ti microalloying and reasonable adding sequence of alloys during smelting as well as the controlled rolling and controlled cooling process. The test results showed that the upper yield strength was 488 MPa, tensile strength was 550 MPa, elongation after fracture was 30%, longitudinal and transverse impact energies at -20 °C were 242 J and 155 J; the microstructure was fine ferrite and pearlite as well as the inclusions were fine and with the size of 2 ~ 3 μm; after the welding thermal simulation test with welding heat input of 100 kJ/cm for test steel, the mechanical property test and metallographic structure were with the basic characteristics of steel with large heat input welding as well as the products are verified to be with good low - temperature impact toughness and welding performances.

**Key words:** steel for offshore platform; low - temperature impact; welding thermal simulation

海洋平台是开发和钻探海上石油及天然气的一种特殊工作场所, 海洋平台所处工作环境条件非常

苛刻,必须在气候和海况恶劣的条件下长期服役<sup>[1-2]</sup>,需要承受海流、风、海浪及洋流载荷等不同形式的复杂载荷,要求其具有较高的强韧性匹配、良好的耐疲劳性能、低温冲击韧性、焊接性能、抗层状撕裂及耐海水腐蚀性能和冷加工性能<sup>[3]</sup>。目前应用较为广泛的为 360 MPa 以下级别的海洋平台用钢,可实现国产化,占总用钢量的 85% 以上,其中 -40 ℃ 的 EH 级用量超过总用量的一半,但已不能完全满足需要,而更高强度以及关键部位仍主要依靠进口。按厚度规格分类,10 ~ 40 mm 厚的约占 60%,40 ~ 60 mm 厚的约占 30%,60 mm 以上及 10 mm 以下的比例在 10% 以内。

海洋作业的发展是迅速的,1964 年作业深度仅为 8 m,经过近 60 年的发展,作业深度由 8 m 增加至 200 m 左右。进入 21 世纪,海洋工业得到前所未有的发展,仅用 20 多年,海洋作业的深度就由 2001 年的 150 m 增加至 2 000 m 左右。中国于 2008 年 4 月开始建造的“海洋石油 981”钻井平台,是我国首次在不依赖国外技术,自主建造完成的首座深水半潜式钻井平台,是世界上首次按照南海恶劣环境设计的,2012 年首次钻探成功,这是我国在海洋石油及天然气开发领域迈出的标志性的一步。

国内海洋平台用钢主要由中国宝武和山钢生产,国外有 JFE、新日铁等<sup>[4]</sup>。本文根据自有产线装备特点,根据氧化物冶金原理进行化学成分设计,并匹配合理的控轧控冷工艺,在实验室成功开发出 390 MPa 级大线能量焊接海洋平台用钢,并对其显微组织、力学性能、焊接热模拟性能进行评估,其各项性能满足标准要求。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 化学成分设计

按照氧化物冶金原理开发 390 MPa 级大线能量焊接海洋平台用钢,核心是让晶内铁素体组织首先析出。在冶炼过程中合金的加入种类和加入量是非

常重要的。在钢种的成分设计过程中一般遵照以下几个原则<sup>[5]</sup>。

(1)适当提高 Mn 含量,降低 C 含量。非调质钢有时存在强度过剩、韧性偏低等问题。C 含量太高,会导致试验钢强度升高,韧性降低,为降低碳当量或者提高韧性,在保证强度的同时,C 含量应控制在较低水平。由 C 含量较低引起的强度不足,通常需要增加 Mn 含量补充,Mn 还有促进珠光体和奥氏体晶粒细化的作用,可以同时提高钢的强度和韧性,但 Mn 含量太高,容易造成铸坯中心偏析,影响钢板内部质量。

(2)冶炼时加入合金元素的种类及数量。氧化物冶金的原理是在冶炼过程中控制氧化物形成的尺寸、分布和组成,这些细小的氧化物成为钢凝固过程中铁素体晶内形核的位置。为了使钢中尺寸适当、细小且弥散分布的特定种类的氧化物充分析出,选择加入合金元素的种类及添加量成为晶内铁素体能否大量、均匀析出的关键所在<sup>[5]</sup>。

(3)辅助合金元素的添加。为了获得尺寸合适且均匀分布的晶内铁素体组织,采用哪种元素进行脱氧,以及制定合理的工艺非常重要,还必须考虑再添加一些合金元素。TiN、VN 等可以促进晶内铁素体的高效析出,V、Ti 等元素的碳化物、氮化物在奥氏体中的溶解度很小,尤其是 TiN、TiC、Ti(C、N) 等高熔点化合物,高温下能阻止奥氏体晶粒的长大,细化其组织。S 在氧化物冶金中的作用是给碳、氮化物的析出提供附着点,从而诱导晶内铁素体的形核,S 含量太高,形成的 MnS 夹杂物会成带状分布;S 含量太低,又会减少 MnS 的数量,不利于晶内铁素体的析出。综上所述,在冶炼大线能量焊接海洋平台用钢时向钢中加入适量的 Si、Nb、V、Ti、S、Mn、RE 等元素可以显著细化晶粒<sup>[5]</sup>。

结合标准要求和预计达到的力学性能指标,进行了 390 MPa 级大线能量焊接海洋平台用钢的化学成分设计,设计的化学成分如表 1 所示。

表 1 试验钢设计的化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Al	Ca	Ce
0.08	0.25	1.4	0.01	0.003	0.04	0.01	0.020	0.003	0.006

### 1.2 冶炼工艺

将准备好的炉料和计算配好的其他合金按顺序

加入冶轧实验室 100 kg 真空感应加热炉,抽真空后进行熔化冶炼,采用最后加 Ca 的合金加入方式<sup>[2]</sup>,

合金加入顺序为:①加入炉料;②一次投料:碳粉、硅铁合金、锰铁合金;③二次投料:按顺序依次加入铌铁合金、铝铁合金、钛铁合金,随后喂钙线,最后加入铈铁合金。待钢水熔化后浇注到矩形钢锭模中,浇

注成尺寸为 150 mm × 200 mm × 250 mm 的矩形钢锭。试验钢的标准及实测冶炼化学成分如表 2 所示。

表 2 试验钢的标准要求及实测化学成分(质量分数)

项目	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Al	Ca	Ce
标准值	≤0.18	≤0.50	0.9~1.6	≤0.020	≤0.020	0.02~0.05	≤0.02	≥0.015		
实测值	0.08	0.25	1.4	0.015	0.003	0.04	0.01	0.019	0.002 2	0.003 5

### 1.3 加热及轧制工艺

将直径为 110 mm 的 25 kg 钢坯装入高温加热炉中,加热至 1 230 °C,总在炉时间为 280 min。粗轧阶段:开轧温度为 1 200 °C,经过 4 道次轧制,终轧温度为 1 010 °C,中间坯厚度为 42 mm。精轧阶段:中间坯在辊道上待温至 935 °C 进行精轧,终轧温度为 845 °C,经过 5 道次轧制成品钢板厚度为 14 mm,具体轧制工艺如表 3 所示。精轧完成后进入层流冷却装置,以 12 °C/s 的冷速将钢板冷至 630 °C。

表 3 试验钢的轧制工艺

轧制	道次	厚度/mm	压下率/%
粗轧	1	89	19.1
	2	72	19.1
	3	55	23.6
	4	42	23.6
	5	32	23.8
	6	25	21.9
精轧	7	21	16.0
	8	17	19.0
	9	14	17.6

### 1.4 检测方法

按照 GB/T 2975—2018 标准《钢及钢产品力学

性能试验取样位置及试样制备》<sup>[6]</sup> 规定从试验钢板宽 1/4 处取横向拉伸试样、纵向和横向夏比 V 型缺口冲击试样,按照 GB/T 228.1—2021 标准《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》<sup>[7]</sup>,在 120 t 电液伺服拉伸试验机进行拉伸试验,依照 GB/T 229—2020 标准《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》<sup>[8]</sup> 在 JBD-300A 低温冲击试验机进行冲击试验。金相试样经研磨、腐蚀后,采用 Axio observer A1M 光学显微镜(OM)对母材显微组织进行检测,采用 LEOEVO50HV 扫描电镜(SEM)、EDAX GENESIS 能谱仪(EDS)对夹杂物进行检测和分析。将热轧态试验钢加工成尺寸为 11 mm × 11 mm × 65 mm 的试样,在 MMS-200 型热力模拟实验机进行焊接热模拟试验。

## 2 试验结果及分析

试验钢的力学性能如表 4 所示,试验钢的上屈服强度为 488 MPa,抗拉强度为 550 MPa,断后伸长率为 30%, -20 °C 纵向冲击功为 242 J,横向冲击功 155 J,各项性能满足 GB/T 712—2022 标准《船舶及海洋工程用结构钢》<sup>[9]</sup> 要求。

对试验钢进行显微组织及夹杂物成分分析,显微组织及夹杂物照片如图 1 所示。

表 4 试验钢力学性能及标准要求

项目	上屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 /%	冲击功(-20 °C,纵向) /J	冲击功(-20 °C,横向) /J
检测值	488	550	30	242	155
标准值	≥390	510~650	≥20	≥41	≥27

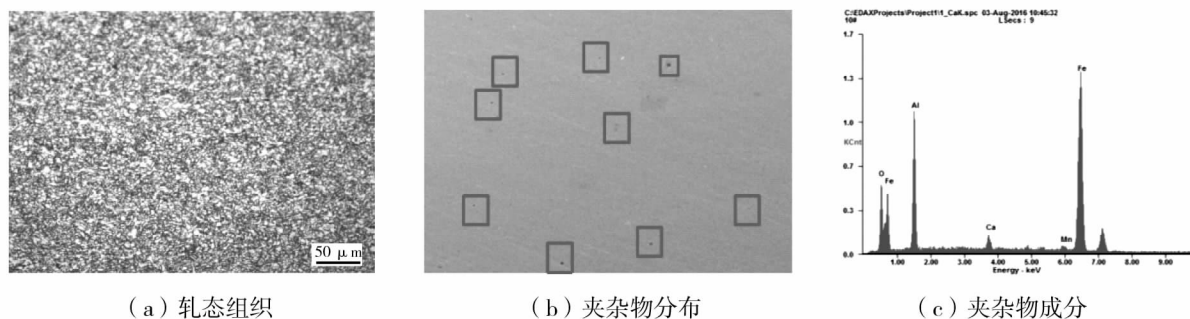


图 1 试验钢金相组织及能谱分析

由图 1 可以看出,试验钢轧态组织为铁素体 + 珠光体,组织均匀;夹杂物尺寸细小,普遍在  $2 \sim 3 \mu\text{m}$  之间。一般认为,当夹杂物尺寸小于  $5 \mu\text{m}$  时,夹杂物对钢材韧性没有明显危害,不易成为裂纹源<sup>[10]</sup>。如图 1(b) 所示,试验钢夹杂物的分布较为均匀,没有发现大颗粒及长条状、团聚状夹杂物。从夹杂物成分可以看出,钢的典型夹杂物由氧化物组成,其中氧化物的部分主要是  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 其次是  $\text{CaO}$ 。

根据以往文献研究结果,有利于晶内铁素体形核的夹杂物大小为  $0.25 \sim 0.60 \mu\text{m}$ <sup>[11]</sup>。部分学者研究表明,夹杂物尺寸在  $0.7 \sim 3.0 \mu\text{m}$  之间时,也可促进晶内铁素体的形核<sup>[11]</sup>。上述分析表明,只有一定粒度范围内的夹杂物才能作为晶内铁素体的有效形核核心,需要增加较小尺寸夹杂物的数量,才能增大晶内夹杂物的表面积,有利于晶内铁素体的形成<sup>[12]</sup>。结合不同学者的研究结果和对试验钢的夹杂物评估,实验室冶炼的 390 MPa 级大线能量焊接海洋平台用钢的夹杂物的形态、尺寸、分布情况符合氧化物冶金的基本特征。

在 MMS-200 型热力模拟试验机将加工好的试样以  $100 \text{ }^\circ\text{C/s}$  的速度加热至峰值温度  $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ , 停留 1 s, 进行焊接线能量为  $100 \text{ kJ/cm}$  的焊接热模拟试验<sup>[2]</sup>。

经热模拟试验后,对试样热影响区进行纵向冲击试验,冲击性能见表 5, 金相组织照片见图 2。由纵向冲击性能可以看出,经  $100 \text{ kJ/cm}$  热输入的焊接热模拟试验后,试验钢  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  纵向冲击功为  $215.5 \text{ J}$ , 和母材性能相比,降幅较小,性能满足标准要求。由金相组织照片可以看出,铁素体晶粒细小,并没有因为热输入量大而快速长大,晶粒得到明显抑制。

表 5 焊接热模拟试验后的纵向冲击吸收功

试验温度/ $^\circ\text{C}$	单值/J			平均值/J
-20	206.5	252.5	187.5	215.5

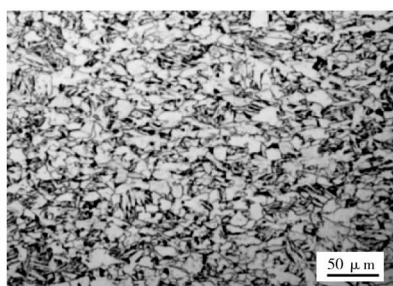


图 2 焊接热模拟试验后组织

研究表明,一般大线能量焊接后,显微组织容易出现贝氏体等硬相组织恶化低温冲击性能<sup>[13]</sup>, 但该试验钢焊接热模拟试验后显微组织还是以铁素体为主。试验钢经大线能量焊接热模拟试验后,  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  的纵向冲击吸收功的均值为  $215.5 \text{ J}$ , 达到母材的 89%。从以上分析可以得知,试验钢经  $100 \text{ kJ/cm}$  热输入的焊接热模拟试验后,纵向仍具有较高的韧性,满足大线能量焊接用钢对低温冲击韧性的要求,从焊接热模拟试样显微组织和低温冲击性能检测分析,该试验钢具备大线能量焊接用钢的所有属性。

### 3 结论

(1) 根据标准和氧化物冶金原理,进行试验钢的化学成分设计,匹配合理的合金加入顺序,采用喂钙线、加铈铁合金冶炼试验钢,同时采用适当的加热、轧制及冷却工艺进行轧制,所得的试验钢成分符合标准及设计要求。

(2)通过显微组织及夹杂物分析,所研发的试验钢显微组织为均匀细小的铁素体+珠光体,钢中夹杂物由氧化物和硫化物复合组成,弥散细小且均匀分布,符合氧化物冶金的基本特征。

(3)热轧态试验钢的上屈服强度为 488 MPa,抗拉强度为 550 MPa,断后伸长率为 30%, -20 °C 纵向冲击功为 242 J,横向冲击功 155 J,各项力学性能符合标准要求。

(4)对 390 MPa 级海洋平台用试验钢进行焊接热模拟试验,峰值温度为 1 250 °C,热输入为 100 kJ/cm,经检测试验钢热影响区显微组织为细小的铁素体和珠光体, -20 °C 纵向冲击功为 215.5 J,和母材性能相比,冲击功降幅较小,满足大线能量焊接用钢的组织、力学性能要求。

### 参 考 文 献

- [1] 李鑫磊. E40 高强度海洋平台用钢的研制与开发[D]. 沈阳:东北大学,2008.
- [2] 姜秉坤. 390 MPa 级大线能量焊接海洋平台用钢板及其生产方法[P]. 中国专利: 201611110904.5, 2016-12-04.
- [3] 胡聆,王鹏建. 高强韧性海洋平台用 E550 钢板生产工艺研究[J]. 宝钢技术, 2012(1): 36-42.
- [4] 刘振宇,唐帅,陈俊,等. 海洋平台用钢的研发生产现状与发展趋势[J]. 鞍钢技术, 2015(1): 1-7.
- [5] 朱立光,张彩军,谷志敏. 应用氧化物冶金技术开发非调质钢的研究[J]. 河南冶金, 2011, 19(6): 1-7.
- [6] GB/T 2975—2018, 钢及钢产品力学性能试验取样及试样制备[S].
- [7] GB/T 228. 1—2021, 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法[S].
- [8] GB/T 229—2020, 金属材料夏比摆锤冲击试验方法[S].
- [9] GB/T 712—2022, 船舶及海洋工程用结构钢[S].
- [10] 吴亦泉. 钙脱氧的氧化物冶金钢中夹杂物及大线能量焊接性能研究[D]. 长沙:中南大学, 2014.
- [11] 柴锋. 低合金高强度船体钢焊接热影响区韧化机理研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- [12] 万响亮,李光强,吴开明. 低合金高强钢针状铁素体组织特征和形成机理[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(6): 1-12.
- [13] 陈光勇. 氧化物冶金工艺对热轧 EH40 钢板大线能量焊接性能的影响[D]. 沈阳:东北大学, 2010.