

首钢低温高韧性系列船板的研发

徐 莉, 麻庆申, 刘学一, 王彦峰, 沈钦义

(首钢技术研究院, 北京 100043)

摘要:介绍了首钢采用低碳成分设计和 TMCP 工艺开发 E 级船板的关键控制技术和工艺路线。通过低碳、Nb、Ti 微合金化的成分设计、控制钢水纯净度、采用合理的两阶段控制轧制及控制冷却工艺, 得到钢质纯净、组织细化的 E 级船板钢。试制结果表明, 拉伸性能、Z 向性能、冷弯性能、低温冲击韧性等各项力学性能良好, 产品质量完全符合 GB 712—2000 国家标准要求, 并达到船级社生产认证要求水平。

关键词:TMCP 工艺; 纯净钢; E/F 级船板

doi:10.3969/j.issn.1672-9587.2010.06.003

Development and production of low temperature and high toughness hull plates in Shougang

XU Li, MA Qingshen, LIU Xueyi, WANG Yanfeng, SHEN Qinyi

(Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043, China)

Abstract: The key technology and process of E Grade hull plates by low-carbon composition design and TMCP process are introduced in this paper. E Grade hull plates with high purity and structure refinement can be produced through the composition design of low-carbon and Nb and Ti-microalloying, the control of molten steel purity and the adoption of two-stage controlled rolling and controlled cooling processes. Results from pilot production show that with good mechanical properties including tensile property, Z-direction property, cold-bending property and low temperature impact property, the plates conform with GB712—2000 standard and meet the certification requirements of nine country classification societies.

Key words: TMCP process; purity steel; E/F Grade hull plate

0 前言

21 世纪以来, 由于经济全球化、船舶用途多样化、技术进步等因素的推动, 船舶工业市场需求显著增长, 全球造船业前景乐观。我国经济持续快速发展, 对外贸易快速增长, 90% 以上的物流靠船舶运输完成。近几年我国船舶工业抓住国际船市呈现空前兴旺的难得机遇, 造船占世界造船的份额从 2000 年造船产量 346.6 万 t 快速发展为 2009 年的 4 243 万 t, 年平均增长率达 100%, 与 2000 年相比, 增长了 11 倍, 占全球造船完工量的份额也从 5.7% 上升到 40%, 超过韩国跃居世界第一, 韩国第二, 日本第三。

随着造船技术水平的不断提高, 船舶品种和性能正向大型化、高技术含量和高附加值方向发展, 研发了一批结构复杂、技术难度大、自动化程

度高的大型集装箱船、大型液化天然气船、液化石油汽船、全铝合金高速水翼船、30 万 t 超级油轮 (VLCC) 等, 逐步形成了 VLCC、苏伊士型原油轮系列; 巴拿马型成品油船及化学品船系列; 超巴拿马型集装箱船系列; 大型散货船、海上浮式生产储卸油装置和钻井平台海洋工程系列等。

造船用钢板的市场与造船业紧密相关, 船用钢板的消耗量一般为造船产量的 25% ~ 30%, 且与所造船舶的平均载重吨位有关。2004 年国内造船需求量为 340 万 t, 2005 年为 440 万 t, 2010 年将达到 1 200 万 t。2004 年国内造船板产量为 368.5 万 t, 2005 年为 486.4 万 t, 2009 年为 1 000 多万 t。目前国内造船板钢的年消耗量大概在 1 200 万 t 左右, 其中 95% 以上为国产钢板, 生产厂家主要有鞍钢、新钢、宝钢、武钢、济钢、湘

钢等,其余有特殊强度要求及特殊尺寸规格要求的都需要从日本、韩国、德国等国家进口。

随着船舶建造向高技术、高附加值方向发展,造船用钢板的使用有向 E 级、F 级、Z 向钢发展的趋势。低温高韧性船板主要是指 -20°C 以下工作海域使用的船板,对应质量等级 E/F 级。E 级高强度船板在满足船体结构用钢板的技术要求(热影响区的脆性低、很好的抗裂纹性能、焊接效率高、热影响区不软化、钢板切断后应变小、抗疲劳强度高、良好的耐腐蚀性能、良好的加工性能)之外,还要求有高的屈服强度及低的韧脆转变温度,在造船过程中采用 E40 代替一般强度 A 级船板,用量可减少 1/4 以上。目前日本造船业高强船板的使用量占船体结构用钢板的 60% 以上,而我国只占 30%。

1 低温高韧性船板的要求

1.1 工艺流程与主要设备

首钢船板的工艺流程为:高炉铁水—铁水预脱硫—氧气顶底复吹转炉—LF 精炼—RH 精炼—板坯连铸—坯料精整—加热—除鳞—轧制—ACC 冷却—矫直—空冷—探伤—取样—标识—入库—发货。

主要设备:公称容量 100 t 顶底复吹转炉;100 t 的 LF 钢包精炼炉;双工位 RH 真空处理装置;单流板坯连铸机;4 300 mm 四辊可逆式粗精轧机;高密度层流冷却系统。

表 1 E 级高强度船板熔炼成分质量分数(国标 GB 712—2000)

w_{C}	w_{Si}	w_{Mn}	w_{P}	w_{S}	w_{AlS}	w_{V}	w_{Nb}	w_{Ti}	C_{eq}
≤ 0.18	≤ 0.50	0.90 ~ 1.60	≤ 0.035	≤ 0.035	≥ 0.015	0.05 ~ 0.10	0.02 ~ 0.05	≤ 0.02	≤ 0.40

表 2 钢材的力学性能要求(国标 GB 712—2000)

钢材等级	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	试验温度为 -40°C 的 A_{KV}/J (板厚 ≤ 50 mm)	
				纵向	横向
E32	315	440 ~ 570	22	≥ 31	≥ 22
E36	355	490 ~ 630	21	≥ 31	≥ 22
E40	390	510 ~ 660	20	≥ 41	≥ 27

表 3 TMCP 工艺交货状态下碳当量要求

钢的等级	$C_{\text{eq}}/\%$	
	板厚 ≤ 50 mm	板厚 50 ~ 100 mm
E32	≤ 0.36	≤ 0.38
E36	≤ 0.38	≤ 0.40
E40	≤ 0.40	—

注: $C_{\text{eq}} = w_{\text{C}} + w_{\text{Mn}}/6 + w_{\text{(Cr+Mo+V)}}/5 + w_{\text{(Ni+Cu)}}/15$

1.2 E 级船板标准成分和性能要求

E 级船板要求 -40°C 低温冲击,为了满足 E 级高强度船板的各项指标要求,从炼钢、连铸、控制轧制、控制冷却、热处理等方面要采取一系列措施。业内为了提高钢板的韧性和防止焊接裂纹而不断地探索细化晶粒、改善碳氮化合物的沉淀效果等技术,强化控制相变功能,以钛系氮化物、稀土元素为主,进一步对硫化锰、硼、钙、铝等元素进行控制,而 TMCP 工艺的应用提高了高强度船板用于船体结构的比例,由以前的 20% ~ 30% 迅速增加到了 60% ~ 70%。

E 级高强度船板国标 GB 712—2000 中要求的成分性能见表 1,力学性能见表 2。从表 1 可以看到为了保证船板具有良好的焊接性能,船板成分中对碳当量有严格的要求:普通工艺交货状态下, $C_{\text{eq}} \leq 0.40\%$; TMCP 工艺交货状态下, C_{eq} 要求见表 3。其次从对该系列船板的成分、性能、交货状态等标准要求可以看到船板的主要技术难点在于:

- (1) 有严格的碳当量。
- (2) 钢板有严格的交货状态要求及对应的碳当量。
- (3) 钢板性能无厚度效应。
- (4) 与同强度其他牌号相比塑性要求高。
- (5) 低温冲击韧性要求下限较高。
- (6) 抗拉强度有上限要求,窄性能波动。

2 化学成分设计

E 级船体用钢对强度有较高要求,尤其对低温(-40°C ,认证时相应再降低 20°C)冲击韧性有很高的要求,而且要具有良好的焊接性能。因此根据 GB 712—2000 标准和各国船级社规范对

TMCP 交货状态船板成分要求设计内控成分,成分设计主要依据如下几个原则:加入 Nb,可提高 TNR 温度,延迟变形奥氏体再结晶,细化铁素体晶粒,提高钢板的强韧性;加入 Ni,改善钢板的低温韧性,保证钢板在低温环境中更加安全地服役;加入微量 Ti,有利于保证含 Nb 钢坯的表面质量,同时可以固 N,从而改善钢板的应变时效冲击性能,另外可以改善焊接性能;降低磷、硫含量,提高

钢的塑韧性。磷含量主要影响钢的塑性,硫含量主要影响钢的冲击韧性和韧脆转变温度,此外钢中硫化物夹杂影响钢的各向异性^[2]。TMCP 交货船板采用低碳、微合金化的成分设计严格控制碳当量,保证良好的焊接性能。试制钢板的成分见表 4,成分满足国标 GB 712—2000 及美国等九国船级社的要求。

表 4 试制钢板的化学成分质量分数

w_C	w_{Si}	w_{Mn}	w_P	w_S	w_{Al}	$w_{Nb}、w_V、w_{Ti}、w_{Mo}、w_{Ni}$
0.03 ~ 0.12	0.10 ~ 0.40	1.20 ~ 1.60	≤0.015	≤0.008	0.02 ~ 0.06	适量(复合添加)

3 钢质纯净度控制

试制钢板成品 P 质量分数控制在 0.015% 以下,冶炼过程采用转炉脱磷工艺,严格控制终渣碱度。为减少从出钢到成品过程回 P,出钢过程中采用挡渣操作,严格控制下渣量,同时向钢包底部加入合成渣,对转炉渣进行改质处理。

试制钢板成品 S 质量分数控制在 0.008% 以下,钢中硫含量的控制主要通过铁水脱硫预处理、控制转炉回硫、出钢渣洗和 LF 炉精炼深脱硫来实现。

试制钢板成品总氧含量控制在 0.002% 以下,冶炼过程采用全流程系统控制方法:转炉冶炼减少补吹次数,控制钢水的过氧化性,出钢采用强脱氧工艺;对钢包渣进行改质,尽量降低炉渣的氧化性;LF 炉精炼进一步净化钢液,降低钢中总氧含量;RH 真空处理保证真空处理时间,提高真空度,进一步降低钢中总氧含量;浇铸过程中做好保护浇铸,防止钢水二次氧化。

4 TMCP 工艺

试制采用 250 mm 厚铸坯,轧制 40 mm 厚钢板,首先选择合理的加热制度,既要保证加热质量,保证合金的充分溶解,同时又要避免过高的加热温度和过长的加热时间导致奥氏体晶粒过分粗化长大。

由于试制钢板较厚,为使钢板厚度方向上的组织均匀、细小,在控制轧制和控制冷却过程中,应通过合理控制轧机的轧制力、轧制扭矩、轧制速度以及轧后控冷的水流量、辊道速度和加速度等设备参数,获得合适的控轧控冷工艺制度。

在粗轧阶段(为奥氏体再结晶区轧制),要加大大道次压下量,使形变在厚度方向上充分渗透至板坯心部,以便于奥氏体能够进行充分地再结晶,达到均匀细化奥氏体晶粒、改造铸态组织的目的。同时,为了达到充分再结晶,粗轧阶段应在 950℃ 以上的温度区间内完成^[3]。

在精轧阶段(为奥氏体未再结晶区轧制),要保证一定量的总变形率(≥50%)^[4],充分发挥控制轧制的作用,使控轧钢板的组织获得尽可能多的位错、变形带等晶体缺陷,为轧后控冷过程中相变形核作组织准备。控冷工艺参数的最大区别在于冷却速率和强制冷却的温度范围(开始冷却温度和终止冷却温度),不同的冷却速率和强制冷却的温度范围对于冷却过程之后钢板的微观结构有不同的影响。

5 试制结果与分析

试制钢板表面质量良好,探伤合格。拉伸性能、Z 向性能、冷弯性能、低温冲击韧性(常规冲击和应变时效冲击性能)均满足国标要求,并达到船级社认证要求水平。

5.1 拉伸及 Z 向性能

为检测试制钢板的拉伸性能以及不同位置性能的均匀性,在钢板头部、尾部的宽度以及厚度不同位置取样坯,按船级社规范以及产品国家标准加工了拉伸试样及 Z 向拉伸试样。具体性能情况见表 5。

由表 5 可以看出,试制钢板拉伸性能完全符合船级社规范对 E/F 级 36 kg 的高强船板钢的要求,并有较大富余;Z 向断面收缩率为 60% 以上,完全达到 Z35 要求,并有较大富余。

表 5 试制钢板的拉伸及 Z 向性能

厚度/mm	取样位置			R_{el}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$
	长度	宽度	厚度				
40	头	1/4	1/4	455	550	27	74/74/77.5
			1/2	435	540	27	
		1/2	1/4	460	560	31.5	
			1/2	435	535	29.5	
	尾	1/4	1/4	440	520	31.5	68/65/62
			1/2	415	510	28.5	
		1/2	1/4	435	530	29	
			1/2	420	520	32.5	

5.2 冲击性能

为检验试制钢板不同位置冲击性能的均匀性,同样在钢板头、尾部宽度的 1/4 位置取样坯,按船级社规范以及产品国家标准加工了常规冲击试样及应变时效冲击试样。应变时效冲击样坯先进行 5% 的预应变,再进行 250℃、保温 1 h 的时效处理,然后加工冲击试样。应变时效冲击性能表征材料经过一定变形和时效处理后的冲击韧性,也是船板认证过程中需要检测的重要性能指标。

材料的应变时效冲击性能通常较常规冲击性能差,尤其在低温下表现更为明显。这主要是因为经过预变形的材料中,游离态的 C、N 等间隙原子在时效处理过程中具备了一定的扩散能力,随着温度的升高和保温时间的延长,C、N 等间隙原子就会向预应变材料中的位错、变形带等缺陷处偏聚^[5],形成“气团”,在加载过程中,位错受到“气团”的钉扎,导致材料强度升高,塑性和韧性下降。常规冲击和应变时效冲击温度为 -20℃、-40℃、-60℃、-80℃,冲击性能详见表 6。

表 6 试制钢板的冲击性能

取样位置	温度/℃	纵向常规 A_{kv}/J				纵向时效 A_{kv}/J			
		1	2	3	平均	1	2	3	平均
头部	-20	343	355	338	345	332	301	328	320
	-40	328	334	334	332	286	289	285	287
	-60	327	330	333	330	287	308	207	267
	-80	300	326	33	220	297	28	192	172
尾部	-20	337	349	334	340	311	323	312	315
	-40	345	355	348	349	310	293	316	306
	-60	321	308	335	321	302	48	296	215
	-80	314	316	280	303	20	176	31	76

由表 6 可以看出,试验钢板的常规冲击吸收功到 -80℃ 都完全满足船级社规范及相关产品国家标准要求,并有较大富余,常规冲击性能稳定达到 F 级要求。应变时效冲击吸收功到 -60℃ 都完全满足船级社规范及国家标准要求,并有较大富余,-80℃ 的平均值也能满足要求,但单值开始出现波动,应变时效冲击性能稳定达到 F 级要求。表 6 的试验数据还表明,试验钢板的头部、中部和尾部的常规冲击性能和应变时效冲击性能较为均匀,冲击吸收功差别不大。

5.3 焊接检验结果

对试制钢板取样,在 50 kJ/cm 的线输入能量

下对试制钢板进行了焊接试验,随后在焊缝中心、熔合线和熔合线以外的位置进行了冲击试验,结果见表 7。

表 7 试制钢板的焊接试验结果

位置	温度为 -60℃ 的 A_{kv}/J			
	1	2	3	平均
焊缝中心	118	117	163	133
熔合线	107	265	109	160
熔合线以外 2 mm	325	304	271	300
熔合线以外 5 mm	336	354	342	344

由表 7 可以看出,试制钢板焊接性能良好,焊缝中心、熔合线以及熔合线以外位置冲击功均值

都在 100 J 以上,完全满足船级社认证标准要求。

5.4 试制钢板的组织结果

试制钢板不同厚度位置的光学金相组织照片见图 1~3。

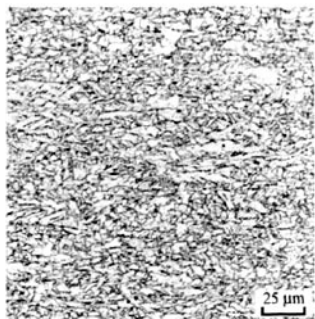


图1 表面组织

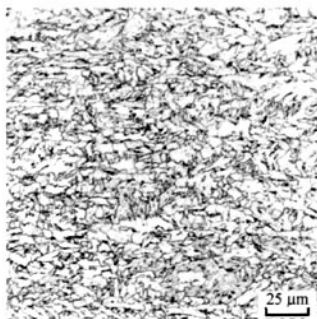


图2 厚度 1/4 处组织

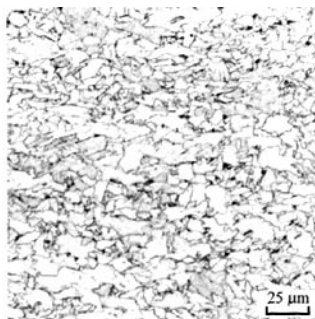


图3 心部组织

试制钢板的表面、厚度 1/4 处、心部组织以铁素体 + 贝氏体组织为主,心部伴有珠光体组织。带状组织不明显,晶粒细小、均匀,晶粒度评级在

11.5 ~ 12.5 之间。本文中的生产工艺,尤其是冷却工艺制度下试制得到的钢板组织以针状铁素体 + 准多边形铁素体组织为主。针状铁素体是中温转变产物,针状铁素体中的位错强化、亚晶强化对于强度具有较大的贡献。其产生要求终轧快冷前必须有一定的变形量,要得到尽量多的针状铁素体,即必须满足一定变形量和快速冷却。

准多边形铁素体与多边形铁素体不同,在准多边形铁素体内含有较高密度的位错和一些亚结构。连续冷却的低碳钢中若含有准多边形铁素体,则表现出极佳的强度和韧性的配合。针状铁素体和准多边形铁素体的复合组织之间的界面均为大角晶界,大角晶界对于解理裂纹传播是个很大的障碍,能有效抑制裂纹的扩展,改善钢的低温韧性。

6 结论

(1) 采用低碳 TMCP 工艺生产厚 40 mm 的钢板各项力学性能良好,产品质量完全符合 GB 712—2000 标准要求,并达到船级社认证要求水平,且有较大富余。

(2) 采用低碳微合金化成分设计的试制钢经控轧控冷工艺后得到的主要是针状铁素体 + 准多边形铁素体的复合组织结构。

(3) 针状铁素体 + 准多边形铁素体的复合组织具有优良的综合力学性能,在获得较高强度的同时可以保证良好的低温韧性,满足 F36 高强船板钢的要求。

参考文献

- [1] 温永红,唐荻,武会宾,等. F40 级船板低温韧性机理[J]. 北京科技大学学报,2008,30(7):724-729.
- [2] 龚红根. 新钢 E36-Z35 船板的开发[J]. 宽厚板,2007,13(3):20-22.
- [3] 高海亮,武会宾,岳峰,等. E36 高强船板钢的开发[J]. 河南冶金,2008,16(5):12-13.
- [4] 王有铭,李曼云. 钢的控制轧制和控制冷却[M]. 北京:冶金工业出版社,1995:75-79.
- [5] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,2001:220-225.