

高强度、高韧性海洋四级系泊锚链钢 的试制及应用

张文基¹, 郭艳¹, 张玉峰¹, 马恒毅², 杨瑞珍², 朱林放²

(1. 江阴兴澄钢铁有限公司, 江苏 江阴 214429; 2. 正茂集团公司镇江锚链厂, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 开发的海洋四级系泊锚链产品, 通过成分设计、热处理特性的试验研究及工业性试制, 生产出的热轧棒材具有较高的抗拉强度、较高的低温冲击值; 具有良好的焊接性能、冷弯性能和良好的热处理特性; 淬火和回火的热处理控制范围宽, 完全可以满足制链工艺要求, 适宜于制链工业大生产。

关键词: 锚链钢; 四级系泊链; 力学性能; 强韧性

中图分类号: TG142.71 文献标识码: A 文章编号: 1004-7638(2000)02-0006-06

TRIAL PRODUCTION AND APPLICATION OF HIGH STRENGTH AND TOUGHNESS R4 MARINE MOORING CHAIN STEEL

ZHANG Wen-ji¹, GUO Yan¹, ZHANG Yu-feng¹, MA Heng-yi², YANG Rui-zhen², ZHU Lin-fang²

(1. Xingcheng Iron & Steel Corp., Jiangsu, Jiangyin 214429, China; 2. Zhenjiang Mooring Chain Mill, Zhengmao Group Corp., Jiangsu, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: The marine mooring chain steel (R4) has been developed through the composition design, heat-treatment performance investigation and pilot-plant test. Hot rolled bar has high tensile strength, high low-temperature impact value and good weldability, cold bendability and heat-treatment property over a wide range of quenching and tempering, which is fully enough to meet the technological requirements of producing chain and suitable for commercial chain manufacture.

Key Words: anchor chain steel; R4 marine mooring chain; mechanical property; high toughness

1 引言

江阴兴澄钢铁有限公司滨江特钢厂根据挪威船级社(DNV)、英国劳氏船级社(LR)、美国船级社(ABS)认可规范对海洋四级系泊锚链的力学性能要求以及镇江锚链厂制链工艺对原材料的特殊要求进行了成分设计, 在滨江现有的“四位一体”短流程生产线上, 通过工业试制, 建立了生产四级系泊链用钢的冶炼、连铸和热轧工艺制度。所作的研究试验有钢的热处理敏感性试验、钢的回火脆性试验、钢的形变时效试验及氢脆时效性能并成功地进行了批量生

产, 填补了国内四级系泊链生产的空白, 成为国内首家通过 DNV、LR、ABS 三个船级社工厂认可的钢厂。

2 材料要求、钢种设计及生产工艺

2.1 材料要求

系泊链产品主要用于海洋石油开采用浮式生产系统、半潜式钻井平台、单点系泊结构和浮式生产储油轮以及其它海洋开发设施, 由于链条长期浸泡在海水中, 条件恶劣, 因此要求系泊链用钢不仅强度高, 韧性好, 而且还要求具有耐海水腐蚀、抗疲劳、耐磨

损等特性。在系泊链的制链工艺过程中, 棒材经闪光焊接后, 制成上千米长的链条, 整条链条再经淬火 + 回火的调质热处理工艺。大型链条在其表面和焊缝处极易产生淬化和回火裂纹缺陷, 一旦产生这样的缺陷, 其中有裂纹的链环必须从整个链条中取掉而重新制作, 这将大幅度地增加能耗, 降低生产效率。另外在焊接过程中, 焊缝处主要元素(如 C, Si, Mn 等)的烧损和堆积, 会降低焊缝处的力学性能。因此通过成分的优化设计, 降低钢种的热处理敏感

性, 提高焊口部分的力学性能, 保证大直径棒材的淬透性是本钢种设计的关键。

DNV、ABS、LR 船级社规范对四级系泊链产品的性能要求如表 1 所示。

2.2 钢种设计

根据系泊链的使用条件, 为提高链条的抗腐蚀能力, 选择含 Cr, Ni, Mo, Nb 为主要合金化元素的钢种, 表 2 为所设计的化学成分范围。

为保证棒材在制链工艺过程中有较宽的热处理

表 1 几家船级社对四级系泊链产品的性能要求

船级社	等级代码	$\sigma_s /$ MPa	$\sigma_b /$ MPa	$\delta_5 /$ %	$\psi /$ %	试验温 度/℃	母材冲击值/J		焊口冲击值/J		σ_s / σ_b	氢脆 (ψ_1 / ψ_2)
							平均	最小	平均	最小		
DNV	NVR4	≥580	≥860	≥12	≥50	0~20	70~50	53~38	56~36	42~27	≤0.92	≥0.85
ABS	RQ4	≥580	≥860	≥12	≥50	-20	50		36		≤0.92	≥0.85
LR	R4	≥580	≥860	≥12	≥50	-20	50		36		≤0.92	≥0.85

注: ψ_1 为不扩氢时的断面收缩率, ψ_2 为扩氢后的断面收缩率

表 2 化学成分范围

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al ₁	Mo	Nb	[O]	[N]	[H]
0.24	0.15	1.20	≤	≤	0.80	0.70	≤	0.020	0.40~	0.02~	≤25	≤90	≤2
~	~	~	0.025	0.025	~	~	0.20	~	0.80	0.06	ppm	ppm	ppm
0.30	0.30	1.60			1.30	1.30		0.050					

注: 残余元素, Sn≤0.020%, Sb≤0.003%, As≤0.010%, B≤0.0008%

工艺范围, 并保证材料制成成品链后, 链条的环背、焊缝及环冠处的力学性能满足船规的要求, 并能适应于制链工艺大生产, 在成分设计时应满足如下的材料特性: ①碳当量应保证大于 1.40^[1], 以保证在镇江锚链厂现有的工艺条件下, 链环焊缝处的抗拉强度及冲击韧性良好; ②冷裂纹敏感系数应小于 0.40, 同时马氏体开始转变温度应大于 350℃, 使之保证在制链热处理过程中不产生淬化和回火裂纹。水淬临界直径应大于 150 mm, 以保证在生产最大直径(Ø110 mm)的链环时具有足够的淬透性。

主要计算模型如下:

(1) 碳当量

$$C_{eq} = C(\%) + [Cr(\%) + Mn(\%) + 2Mo(\%)] / 3$$

(2) 冷裂纹敏感系数

$$P_{cm} = C(\%) + Si(\%) / 30 + [Mn(\%) + Cr(\%) + Cu(\%)] / 20 + Ni(\%) / 60 + Mo(\%) / 15 + V(\%) / 10 + 5B(\%)$$

(3) 马氏体开始转变温度

$$M_s = 550 - 361C(\%) - 39Mn(\%) - 20Cr(\%) - 17Ni(\%) - 5Mo(\%) + 30Al(\%)$$

2.3 生产工艺

四级系泊链棒材在“四位一体”的短流程特钢生产线上生产, 其生产工艺流程为:

EAF(电炉冶炼、初始合金化、偏心炉底出钢)→LF(钢包精炼、合金微调、喂 Al 线、Si-Ca 线)→VD(真空脱气)→CCM(5 流连铸、浇铸断面: 300 mm × 300 mm)→钢坯清理修磨; 钢坯加热→除鳞→粗轧(5 机架)→中轧(6 机架)→精轧(6 机架)→空冷→定尺锯切→打捆下线→超声波、涡流组合探伤→检查→打捆包装→出厂。

3 钢材的组织与性能

3.1 低倍检验

在连铸工艺过程中, 在任一流的浇铸开始和末尾所轧材上取低倍试样, 检验低倍组织缺陷, 检验结果如表 3 所示, 轧材无缩孔、皮下气泡、白点、一般点状偏析等缺陷。

表 3 低倍检验结果

一般疏松	中心疏松	中心偏析
0.5~1.0	0.5~1.5	0.5~1.5

3.2 高倍检验

3.2.1 非金属夹杂

在热轧棒材上取样检验轧材的非金属夹杂情况。采用 GB 10561 标准中的 JK 评级图评定非金属夹杂级别, 检验结果如表 4 所示。

表 4 非金属夹杂物

A		B		C		D	
粗	细	粗	细	粗	细	粗	细
0.5~1.0		0~0.5		0	0	0	0

3.2.2 金相组织

热轧状态的金相组织为粒状贝氏体(图 1), 经淬火加回火调质处理后的钢材的金相组织为细小均匀的粒状贝氏体(图 2)。

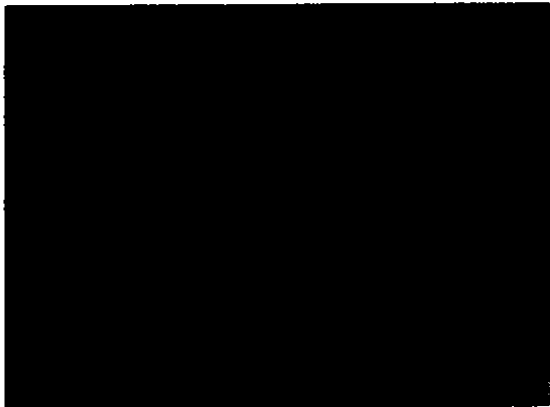


图 1 热轧状态组织 × 500

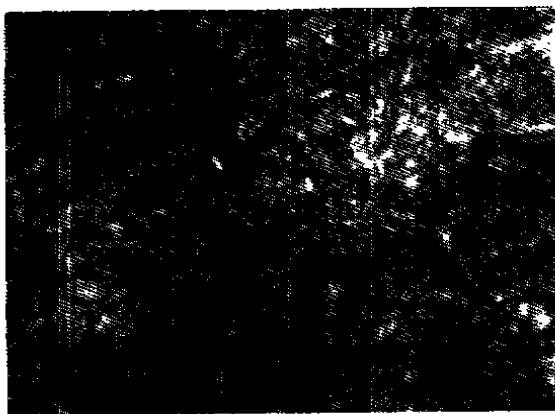


图 2 调质状态组织 × 500

3.3 力学性能

3 个浇次, 7 个炉号的力学性能检验结果如表 5 所示。

从表 5 试验结果看出, 棒材不仅具有较高的强度, 其冲击韧性远高于船规的要求, 表明该材料具有优异的综合力学性能。

4 棒材热处理敏感性及其脆性试验

4.1 正火试验

根据相变点的测试结果 $A_{c3} = 830\text{ }^{\circ}\text{C}$, 将试料分别加热至 $A_{c3} + 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A_{c3} + 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A_{c3} + 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A_{c3} + 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度, 并保温 30 min (随炉升温), 测试棒材的力学性能。每一试料取 1 个拉伸试样, 3 个冲击试样, 取样位置 $1/6D$ (D 为棒材直径)。试验结果如表 6 所示。试验结果表明: 在 $860\sim 920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的正火温度范围以内, 棒材的强度、塑性和冲击韧性非常稳定, 当正火温度高于 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 塑性及冲击韧性有所降低。同时可以看出, 热轧棒材具有较高的强度, 未经调质处理的热轧棒材低温冲击值满足不了船规要求。

4.2 淬火和回火试验

将试料按表 7 给出的淬火温度和淬火时间进行调质处理, 测试棒材的力学性能。每一试料取 1 个拉伸试样, 3 个冲击试样, 取样位置 $1/6D$ 。试验结果如表 7 所示。试验结果表明: 在 $860\sim 920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的淬火温度范围内, 在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的回火工艺下, 棒材的强度、塑性和冲击韧性非常稳定; 在 $890\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淬火工艺条件下, 随着回火温度的升高, 棒材的强度降低, 冲击韧性提高, 表明回火温度对材料的力学性能的影响较为明显。同时可以看出, 在 $860\sim 920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的淬火温度及 $580\sim 640\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的回火温度范围内, 材料的力学性能均远高于规范的要求, 材料具有较高的强度和较好的冲击韧性, 且热处理温度控制范围宽, 适宜于制链工业大生产。

4.3 回火脆性试验

将试料按如下工艺要求进行热处理后对材料力学性能进行测试, 研究材料的回火脆性特性。试料状态: 原材料奥氏体化, 淬火后再加热至允许的最低回火温度 ($580\text{ }^{\circ}\text{C}$)。保温后采用两种不同的冷却方式: 快冷, 采用水冷; 缓冷, 冷却到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间不得小于 40 min, 且要求随炉冷却。对每种冷却方式, 做 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 3 组 V 型缺口冲击试验, 每组取 3 个冲击试样, 取样位置 $1/6D$ 。试验结果如表 8 所示。一般中碳合金结构钢在 $450\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间长期回火或回火后缓慢通过该

温度区时, 出现的冲击韧性降低的现象, 称之为高温回火脆性。已基本确认高温回火脆性是由 P、As、Sb、Sn、Pb 等元素在奥氏体晶界偏聚导致晶界脆化所引起的^[2]。试验结果表明: 即使采用缓

慢的冷却速度所测得的材料冲击韧性仍远高于船级社规范的要求, 表明通过对残余元素的有效控制, 在淬火加回火热处理之后, 采用快速冷却可获得非常优异的低温冲击韧性。

表 5 力学性能检验结果

炉号	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	ψ /%	$A_{kv}(-20\text{℃})$ /J
H9900604	770	980	17	61	130/138/140
H9900605	850	1010	18	60	132/140/130
H9902488	800	915	19	63	122/136/148
H9902489	800	940	19	64	126/132/136
H9902490	780	900	21	67	170/164/160
H9902491	780	910	20	61	144/160/156
H9902618	860	980	18	58	114/102/112

表 6 正火试验结果

编号	试样状态	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	ψ /%	$A_{kv}(-20\text{℃})$ /J
1	860℃ + 30 min	895	1160	14	41	20/14/16
2	890℃ + 30 min	840	1160	14	40	22/18/18
3	920℃ + 30 min	995	1170	14	46	20/18/16
4	950℃ + 30 min	1010	1180	12	38	18/20/18

表 7 淬火和回火试验结果

编号	试样状态		σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	ψ /%	$A_{kv}(-20\text{℃})$ /J
	淬火	回火					
1	860℃ + 30 min	600℃ + 60 min	850	1020	17	66	140/132/134
2	890℃ + 30 min	600℃ + 60 min	810	985	16	67	134/130/136
3	920℃ + 30 min	600℃ + 60 min	865	1010	16	65	132/128/128
4	890℃ + 30 min	600℃ + 30 min	835	1000	17	65	130/134/134
5	890℃ + 30 min	600℃ + 90 min	845	995	19	65	132/124/122
6	890℃ + 30 min	560℃ + 60 min	880	1070	17	62	130/122/126
7	890℃ + 30 min	580℃ + 60 min	840	1030	18	64	108/110/108
8	890℃ + 30 min	620℃ + 60 min	770	935	21	70	144/150/140
0	890℃ + 30 min	640℃ + 60 min	780	910	21	68	140/142/144

注: 淬火和回火冷却介质为水

表 8 回火脆性试验

编号	试样状态	侧膨胀			纤维断面率			$A_{kv}(-20\text{℃})$ /J		
		0℃	-20℃	-40℃	0℃	-20℃	-40℃	0℃	-20℃	-40℃
11	快冷	1.7/1.3/1.4	1.6/1.4/1.2	1.7/1.6/1.4	100/100/100	100/100/100	100/100/100	156/144/151	150/144/140	152/140/156
12	慢冷	1.6/1.4/1.6	1.5/1.5/1.4	0.9/1.0/1.3	100/100/100	100/100/100	90/100/100	146/132/136	140/136/128	118/118/127

注: 12 号试样以 54℃/h 的冷却速度随炉冷却

4.4 形变时效试验

通过夏比 V 型冲击试验方法, 测定棒材的形变时效敏感性。试料状态: ①模拟调质热处理; ②模拟调质热处理与形变 5%; ③模拟调质热处理与形变 5%, 在 100 ℃ 进行 1 h 时效处理。对每种状态, 做 0

℃、-20 ℃、-40 ℃ 的 3 组 V 型缺口冲击试验, 每组取 3 个样, 取样位置 1/6D。试验结果如表 9 所示。试验结果表明: 试样在 3 种状态下都具有非常优异的低温冲击韧性, 表明材料具有优良的抗形变时效特性。

表 9 形变时效试验

试样状态	侧膨胀			纤维断面率			A_{kv}/J		
	0 ℃	-20 ℃	-40 ℃	0 ℃	-20 ℃	-40 ℃	0 ℃	-20 ℃	-40 ℃
模拟热处理	1.1/1.4/1.3	1.5/1.4/1.3	1.6/1.6/1.2	90/90/90	100/90/90	90/100/90	140/132/142	142/130/134	138/128/126
模拟热处理和 5% 形变	1.6/1.3/1.6	1.4/1.4/1.6	1.3/1.4/1.6	90/90/90	80/80/90	90/90/90	132/124/138	124/126/132	116/120/110
模拟热处理和 5% 形变 100 ℃ 1 h 时效	1.6/1.5/1.8	1.3/1.7/1.6	1.5/1.7/1.2	90/90/90	90/90/90	90/100/90	150/132/154	132/152/150	120/128/122

4.5 氢脆试验

氢对钢的塑性, 特别是断面收缩率影响很大。一般随着氢含量的增加, 钢的断面收缩率急剧降低。如果在 200 ℃ 以上的温度进行足够时间的扩散以后, 则可以去除轧材中的氢离子或氢原子, 因此可通过扩氢和不扩氢两种状态下轧材的断面收缩率之比来检验钢材的抗氢脆时效特性。试料取自浇铸开始和浇铸末期铸坯所轧材。每一试料整体调质处理以后, 从中心部位取两个 $\phi 14$ mm 拉伸试样, 一个拉伸试样在机加工后 1.5 h 内进行拉伸试验, 另一试样在 250 ℃ 进行 2 h 的低温扩散后再进行拉伸试验 (拉伸位移速度 ≤ 0.0003 m/s), 其两个拉伸试样的断面收缩率 ψ 之比 (未经低温扩散的 $\psi\%$ 与经低温扩散的 $\psi\%$ 之比) 可以检验轧材的抗氢脆时效性。试验结果如表 10 所示, 结果表明:

在冶炼过程中, 按真空处理的工艺进行脱氢处理后, 将在线测定的氢含量控制在 2 ppm 以下, 轧材的 ψ_1/ψ_2 大于 0.85, 该轧材的抗氢脆时效性能可满足船规要求。

5 制链工艺及用户使用情况

制链工艺为: 下料 → 车削剥皮 → 加热弯链 → 接头对焊 → 去毛刺 → 压档成型 → 调质处理 (淬火 + 回火) → 成品链 → 抛丸、涂漆 → 磁粉探伤 → 检验 → 包装 → 出厂。成品链的各项性能检验结果如表 11 所示。结果表明: 用该材料制成的锚链环背及焊缝处的拉伸及冲击性能优良, 其实物质量远高于船规要求, 试制期间生产的四级系泊链产品同时通过了挪威船级社 (DNV)、英国劳氏船级社 (LR)、美国船级社 (ABS) 的工厂认可和实物质量认可。

表 10 氢脆试验

编号	对应连铸坯	试样状态	σ_b/MPa	$\delta_5/\%$	$\psi/\%$	ψ_1/ψ_2
14-1	浇注开始	不扩氢	925	16	62	0.93
14-2		扩氢	920	18	67	
15-1	浇注末期	不扩氢	930	18	63	0.94
15-2		扩氢	930	19	67	

表 11 成品链 ($\phi 105$ mm) 力学性能

σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\delta_5/\%$	$\psi/\%$	$A_{kv}(-20\text{℃})/J$	备注
835	908	20	71	130/140/140	环背
819	906	13	51	120/105/126	焊口

注: 调质处理工艺为 890 ℃ 淬火, 600 ℃ 回火

6 结论

(1) 根据挪威船级社(DNV)、英国劳氏船级社(LR)、美国船级社(ABS)认可规范对海洋四级系泊链棒材的力学性能要求以及镇江锚链厂制链工艺对原材料的特殊要求, 设计确定的成分, 在保证碳当量大于 1.4、冷裂纹敏感系数小于 0.4、马氏体开始转变温度大于 350 ℃、水淬临界直径大于 150 mm 的条件下, 可获得优异的综合力学性能(直径小于 110 mm)。

(2) 在 860 ~ 920 ℃ 的淬火温度范围及 580 ~ 640 ℃ 的回火温度范围内, 通过回火后的快速冷

却, 材料可获得较高的强度和较高的低温冲击韧性。

(3) 热轧棒材具有优异的抗形变时效和抗氢脆时效的特性。

(4) 兴澄钢铁公司在试制期间生产的四级系泊链用钢, 经用户使用证明: 具有较高的抗拉强度、较高的低温冲击值; 具有良好的焊接性能、冷弯性能和良好的热处理特性; 淬火和回火的热处理控制范围宽, 完全可以满足制链工艺要求, 适宜于制链工业大生产。

(5) 四级系泊链热轧棒材和四级系泊链产品同时通过 ABS、LR、DNV 三个船级社工厂认可。

参考文献:

- [1] 日本国家专利. 高强度高韧性系泊链用钢材[P]. 昭 60 - 86244.
- [2] 戚正风. 金属热处理原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 183 - 184.

编辑 雷念慈

收稿日期: 2000 - 03 - 12

冷轧和退火 IF 钢板中 {111}⟨110⟩ 和 {111}⟨112⟩ 织构的形成

使用电子背散射衍射(EBSD)方法, 对不完全退火冷轧 Ti-IF 钢再结晶织构中相对占优势的 {111}⟨112⟩ 和 {111}⟨110⟩ 取向进行了检验。在 {111}⟨uvw⟩ 和 {hkl}⟨110⟩ 变形晶粒的晶界上, 观察到超乎寻常数量的接近 {111}⟨112⟩ 取向的再结晶晶粒。研究人员认为, {111}⟨uvw⟩ 晶粒附近存在的“软

化”{hkl}⟨110⟩ 取向对该 {111}⟨uvw⟩ 晶粒内形变组织的形成施加影响, 结果有助于在再结晶期间近似 {111}⟨112⟩ 取向的晶核生成。该研究还指出, 晶内切变带的形成是该过程的必要组成部分。这种机理对冷轧 IF 钢中所见的 {hkl}⟨110⟩ 形变织构和 {111}⟨112⟩ 再结晶织构间的关系提供了一种新的解释。

雷念慈 摘译自《ISIJ》, 1999(9): 923—929

郑之旺 校