

(14) 174

高强度高韧性海洋四级系泊锚链钢的试制及应用

张文基 郭艳 张玉峰
 (江阴兴澄钢铁有限公司, 江阴 214429)

马恒毅 杨瑞珍 朱林放
 (正茂集团公司镇江锚链厂)

Pilot Production and Application of High Strength and Toughness R4 Offshore Mooring Chain Steel

Zhang Wenji, Guo Yan and Zhang Yufeng
 (Jiangyin Xingcheng Iron and Steel Co Ltd, Jiangyin 214429)

Ma Hengyi, Yang Ruizhen and Zhu Linfang
 (Zhenjiang Mooring Chain Works, Zhengmao Group)

p754.5

高强度高韧性海洋四级系泊锚链钢 · 试制 · 应用

1 材料要求及钢种设计

1.1 系泊链产品使用条件及加工工艺要求

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他海洋开发设施,由于条件恶劣,链条长期浸泡在海水中,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,再经淬火+回火的调质热处理工艺。对于大型链条在其表面和焊缝处极易产生淬火和回火裂纹缺陷,

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。同时由于在焊接过程中,焊缝处主要元素(如 C、Si、Mn 等)的烧损和堆积,将降低焊缝处的力学性能。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。

1.2 对四级系泊链产品的性能要求

挪威船级社(DNV)、美国船级社(ABS)、英国劳氏船级社(LR)规范对四级系泊链产品的性能要求如表1所示。

表1 对四级系泊链产品的性能要求

Table 1 Requirement of properties for R4 Offshore Mooring Chain Product

船级社	等级 代码	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	Ψ /%	试验温度 /°C	母材冲击功/J		焊口冲击功/J		σ_s/σ_b	氢脆
							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

1.3 钢种设计

根据系泊链的使用条件和性能要求,选择 Cr、Ni、Mo、Nb 为四级系泊链产品的主要合金化元素。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,碳当量按以下公式计算:

$$C_e = C(\%) + [Cr(\%) + Mn(\%) + 2Mo(\%)]/3$$

在镇江锚链厂现有的工艺条件下,碳当量大 于 1.40 才能保证链环焊缝处的抗拉强度及冲击韧性,获得良好的综合力学性能。

(2) 冷裂纹敏感系数应小于 0.40,其计算公式如下:

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

(3) 马氏体开始转变温度应大于 350 ℃, 马氏体开始转变温度按以下公式计算:

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

满足以上条件, 才能保证在制链热处理过程中不产生淬火和回火裂纹。加入一定量的 Cr、Ni、Mo、Nb、Mn 等元素, 使水淬临界直径大于 150 mm, 以保证在生产最大直径(Φ110 mm)的链环时具有足够的淬透性。

为满足以上条件, R4 系泊锚链钢中各元素的控制范围如表 2。

表 2 R4 系泊锚链钢控制化学成分/%

Table 2 Chemical composition controlled for R4 Offshore Mooring Chain Steel/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al _T	Mo	Nb
0.24 - 0.30	0.15 ~ 0.30	1.20 ~ 1.60	≤0.025	≤0.025	0.80 ~ 1.30	0.70 ~ 1.30	≤0.20	0.020 ~ 0.050	0.40 ~ 0.80	0.02 ~ 0.06

注:① 残余元素的要求: Sn≤0.020%, Sb≤0.003%, As≤0.010%, B≤0.0008%。

② 钢中气体含量要求: [O]≤25×10⁻⁶, [N]≤90×10⁻⁶, [H]≤2×10⁻⁶

2 生产工艺

四级系泊链棒材采用如下工艺生产:

EAF(电弧炉冶炼, 初始合金化, 偏心炉底出钢)→LF(钢包精炼, 合金微调)→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。

系泊链棒材冶炼时采用符合国家标准要求的各类铁合金(Fe-Mn, Fe-Cr, Fe-Nb, Fe-Mo)。炼钢加入一定量的低磷、低硫正品生铁, 采用 Sn、As、Cu、Pb 含量低的废钢。

EBT 钢包加脱氧剂, 加入量根据终点碳确定。LF 终了喂铝线, 调整成品铝含量。

EAF 钢包加入铁合金, 将钢水化学成分粗调至要求的中下限。在 LF 中精调至标准要求的下限或目标值。

真空脱气时, VD 真空度在 133 Pa 以下保持时间大于 12 min, 总真空时间≥20 min, 保证 [H] < 2×10⁻⁶, [N]≤80×10⁻⁶。

连铸时钢水过热度与铸坯拉速示于表 3。

轧钢时, 钢坯预热温度 < 850 ℃, 加热段温度 < 1 000 ℃, 均热段温度为 1 140 ~ 1 200 ℃, 开轧温度为 1 000 ~ 1 100 ℃, 终轧温度为 960 ~ 1 020 ℃, 终轧速度为 2.5 ~ 3.5 m/s。

表 3 连铸时钢水过热度与铸坯拉速对照表

Table 3 Overheating of metal and drawing speed of billet during concasting

方坯/mm	钢水不同过热度下的铸坯拉速/m·min ⁻¹					
	5 ~ 10 ℃	10 ~ 15 ℃	15 ~ 20 ℃	20 ~ 25 ℃	25 ~ 30 ℃	30 ~ 35 ℃
180 × 180	1.70	1.65	1.60	1.60	1.55	1.50
300 × 300	0.85	0.80	0.80	0.75	0.75	0.70

3 钢材的性能

3.1 力学性能

3 个浇次, 7 个炉号的钢材力学性能检验结果如表 4 所示。从表 4 可以看出, 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。

表 4 钢材力学性能

Table 4 Mechanical properties of steel product

σ _s /MPa	σ _b /MPa	δ ₅ /%	ψ/%	A _k /J(-20 ℃)
770 ~ 860	900 ~ 1 010	17 ~ 21	58 ~ 67	102 ~ 170

3.2 热处理敏感性及氢脆时效试验

3.2.1 形变时效试验

通过夏比 V 型冲击试验, 测定棒材的形变时效敏感性。

(1) 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。

(2) 对每种状态，做 0℃、-20℃、-40℃ 的三组 V 型缺口冲击试验，每组取 3 个试样，取样位置 (1/6)D。

(3) 试验结果表明：试样在三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。

3.2.2 氢脆试验

由于氢对钢的塑性特别是断面收缩率影响很大，随着氢含量的增加，钢的断面收缩率急剧降低。如果在 200℃ 以上温度进行足够时间的扩散以后，可以去除轧材中氢离子或氢原子，因此通过两种状态下的轧材的断面收缩率之比来检验钢材的抗氢脆时效特性。

(1) 试料取自浇铸开始和末期的铸坯轧材。

(2) 每一试料整体调质处理以后，从中心部位取两个拉伸试样 (Φ14 mm)，一个拉伸试样在机加工后 1.5 h 以内进行拉伸试验，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 mm/s)。

(3) 两个拉伸试样的断面收缩率 Ψ 之比应大于 0.85 (未经低温扩散的 $\Psi\%$ 与经低温扩散的 $\Psi\%$ 之比)。

(4) 在冶炼过程中，按真空处理工艺进行脱氢处理后，将在线测定的氢含量控制在 2×10^{-6} 以下，轧材的抗氢脆时效性能即可满足船规要求。

4 制链工艺及用户使用情况

(1) 制链工艺

下料 → 车削剥皮 → 加热弯链 → 接头对焊 → 去毛刺 → 压档成型 → 调质处理成品链 → 抛丸、涂漆 → 磁粉探伤 → 检验 → 包装 → 出厂。

(2) 成品链的室温力学性能检验结果如表 5。成品链 -20℃ 的冲击性能列于表 6。

表 5 成品链 (Φ105) 室温力学性能

Table 5 Mechanical properties of Φ105 finished chain

试样号	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	Ψ /%	备注
241	830	917	22	67	环背
242	825	913	15	52	焊口

表 6 成品链 -20℃ 冲击功

Table 6 Impact energy of finished chain at -20℃

试样号	A_{KV} /J(环背)			试样号	A_{KV} /J(焊口)			试样号	A_{KV} /J(环冠)			备注
341	140	139	139	342	116	45	60	343	140	141	141	STUD
344	139	140	140	345	120	105	126	346	141	140	70	STUD
347	140	140	141	348	45	55	66	349	141	140	142	STUD
365	137	139	138	366	80	91	73	367	142	142	130	STUD-LESS
368	142	142	142	369	96	76	47	370	142	142	142	STUD-LESS
371	142	142	142	372	117	123	65	373	80	140	139	STUD-LESS

试验结果表明：用该材料制成的锚链环背和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。

5 结论

(1) 根据对海洋四级系泊链棒材的性能要求设计确定的成分，在保证碳当量大于 1.40、冷裂纹敏感系数小于 0.40、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) 热轧棒材具有优异的抗形变时效和抗氢脆时效的特性。

(3) 试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和低温冲击值；良好的焊接性能、冷弯性能和热处理特性；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。

张文基，男，50 岁，工程师，江阴兴澄钢铁有限公司副总经理。1987 年毕业于上海工业大学钢铁冶金专业。

收稿日期：2000-03-17