

· 工艺技术 ·

## R4 级海洋系泊链 Φ140 mm 圆钢的开发

钱 刚<sup>1,2</sup> 雷应华<sup>2</sup> 陈长西<sup>2</sup> 郑文超<sup>2</sup> 陈 君<sup>2</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 大冶特殊钢股份有限公司, 黄石 435001)

**摘 要** 大冶特钢采用 60 t EBT 电弧炉-70 t LF 精炼 + RH 脱气-3 流 350 mm × 470 mm 方坯连铸机-850 mm 初轧 + 750 mm 半连轧工艺生产了成分 (%) 为 0.21C、1.45Mn、1.44Cr、1.21Ni、0.49Mo、0.07Nb Φ140 mm R4 级系泊链钢。结果表明,通过 LF 精炼 45 min,喂 Al 线和 Ca-Si 线脱氧后,进行 RH ≤ 66.65 Pa 真空处理 20 min + 软吹氩 ≥ 10 min,使系泊链钢成品中的氧含量达 14.8 × 10<sup>-6</sup>,氮含量 69.8 × 10<sup>-6</sup>,氢含量 1.2 × 10<sup>-6</sup>,偏析和疏松 0.5 级,夹杂物 0~1 级, -40 °C 时冲击功 ≥ 100 J,各类指标均满足标准要求。

**关键词** LF + RH 处理 连铸 R4 级系泊链钢

## Development of Φ140 mm Round Bar for R4 Offshore Mooring Chain

Qian Gang<sup>1,2</sup>, Lei Yinghua<sup>2</sup>, Chen Changxi<sup>2</sup>, Zheng Wenchao<sup>2</sup> and Chen Jun<sup>2</sup>

(1 School of Metallurgy and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Daye Special Steel Corp Ltd, Huangshi 435001)

**Abstract** The Φ140 mm bar of steel (0.21C, 1.45Mn, 1.44Cr, 1.21Ni, 0.49Mo, 0.07Nb) for R4 offshore mooring chain was produced at Daye Steel by 60 t EBT arc furnace - 70 t LF refining + RH vacuum degassing - 3 strand 350 mm × 470 mm billet caster - 850 primary mill blooming - 750 semi-continuous mill rolling process. The results showed that with LF refining for 45 min, feeding Al wire and Ca-Si wire deoxidizing, then ≤ 66.65 Pa RH vacuum degassing for 20min + soft argon blowing for ≥ 10 min, the oxygen content in finished products of steel for offshore mooring chain was 14.8 × 10<sup>-6</sup>, nitrogen content 69.8 × 10<sup>-6</sup>, hydrogen content 1.2 × 10<sup>-6</sup>, segregation and porosity rating were 0.5, inclusion rating 0~1, impact energy at -40 °C ≥ 100 J and each index met the requirement of standard.

**Material Index** LF + RH Process, Concasting, Steel for R4 Offshore Mooring Chain

R4 级海洋系泊链<sup>[1-3]</sup>应用于移动式海洋系泊单元、海洋负载系统和固定式海洋开发设施的系泊结构<sup>[4]</sup>。20 世纪 70 年代以来,海洋石油平台所用的系泊链产品技术被日本、瑞典、西班牙等少数国家垄断。我国从 20 世纪 90 年代中期开始开发海洋系泊链用钢,但级别较低<sup>[4]</sup>。

随着海洋运输和海洋开发的发展,大规格海洋系泊链用钢的需求量越来越大。目前国内 Φ100 mm 以上规格系泊链用钢需求量在 2.0 ~ 2.5 万 t/a,2008 年需求量预计达到 5.0 ~ 6.0 万 t/a,市场前景广阔。而 R4 级系泊链用钢 Φ120 mm 以上规格均采用模铸工艺组织生产,成本高,产品市场竞争力不强。大冶特殊钢股份有限公司利用工艺技术装备优势,采用先进的高效短流程生产工艺,开发出 Φ140 mm R4 级系泊链用钢,产品质量和性能完全满足标准要求。

### 1 工艺流程及主要装备参数

R4 级系泊链钢大规格圆钢生产工艺流程为:

表 1 EBT 电弧炉主要技术参数  
Table 1 Main parameters of EBT arc furnace

项目	炉型	
	DC	AC
熔炼周期/min	65	55
日平均炉数	21	23
平均容量/t	65	65
炉料组成	铁水 42%, 废钢 58%	
变压器容量/MVA	56	25
电极直径/mm	500	500
电耗/(kWh · t <sup>-1</sup> )	250	250
电极消耗/(kg · t <sup>-1</sup> )	0.9	2
氧耗/(m <sup>3</sup> · t <sup>-1</sup> )	65	65
燃气耗/(m <sup>3</sup> · t <sup>-1</sup> )	无	无
产量/(万 t · a <sup>-1</sup> )	45	45
投产年份	1997	1985

废钢、热装铁水 → EBT 电弧炉 (表 1) → LF 精炼 (表 2) + RH 脱气 → 大方坯连铸 (表 3) → 850 机组初轧开坯 → 750 半连轧成材 → 钢材退火 → 表面剥皮 → 超声波探伤 → 检验、包装入库。

采用 CS-344 碳硫分析仪、E983 直读光谱分析仪,分析 R4 级系泊链钢熔检成分和材上成分

表 2 LF 主要技术参数  
Table 2 Main parameters of ladle furnace

项目	参数
额定处理量/t	70
钢包直径/m	2.35
自由空间/mm	700 ~ 1 000
变压器容量/MVA	11
升温速度/( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ )	4

结果(表 4)。

## 2 工艺要点

### 2.1 电弧炉冶炼

铁水装入量  $\geq 30$  t; 合金料烘烤, EBT 出钢  $[S] \leq 0.050\%$ , 电弧炉出钢  $[P] \leq 0.005\%$ , 随钢流加低 Cr、Ni 板、Mo-Fe、Mn-Si 等合金。出钢温度  $\geq 1 670$   $^{\circ}\text{C}$ , 炉后合金化, 达到所要求成分范围。全程泡沫渣; 出钢量 68 ~ 72 t/炉; 做到无渣出钢;

表 3 连铸机主要技术参数  
Table 3 Main parameters of concaster

项目	参数
中间包容量/t	25
中间包过热度/ $^{\circ}\text{C}$	10 ~ 25
铸坯断面/mm $\times$ mm	350 $\times$ 470
弧形半径/m	16
流数	3
流间距/mm	2 100
铸(拉)坯速度/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	0.26 ~ 0.40
铸坯定尺长度/m	2.2, 6
冶金长度/m	30
出坯温度/ $^{\circ}\text{C}$	900
矫直方式	多点
二次冷却方式	汽雾
电磁搅拌(M-EMS)	有
铸流保护	Ar 气保护
连铸机平均作业率/%	80
连铸机连浇铸炉数	10
平均浇铸时间/min	45 ~ 60
生产能力/( $\text{万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ )	45

表 4 R4 级系泊链钢化学成分和气体含量  
Table 4 Chemical compositions and gas content of steel for R4 offshore mooring chain

项目	化学成分/%											气体含量/ $10^{-6}$	
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	Al	[O]	[N]
标准要求	0.15 ~ 0.24	0.80 ~ 1.60	0.17 ~ 0.37	$\leq 0.020$	$\leq 0.015$	1.00 ~ 1.70	1.00 ~ 1.40	0.20 ~ 0.60	$\leq 0.25$	0.02 ~ 0.06	$\leq 0.10$	$\leq 25$	$\leq 150$
熔炼	0.20	1.45	0.32	0.010	0.005	1.45	1.20	0.48	0.10	0.07	0.034	-	-
成品	0.21	1.45	0.33	0.010	0.003	1.44	1.21	0.49	0.12	0.07	0.023	14.8	69.8

钢包烘烤温度  $\geq 800$   $^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.2 二次精炼

除加合金调整成分外, 精炼全程控制软吹氩; 白渣操作, Si 粉分批加入渣面扩散脱氧; 取第 1 样温度  $\geq 1 540$   $^{\circ}\text{C}$ , 按目标微调熔炼成品成分; 连浇炉号钢水成分偏差符合:  $|\Delta C| \leq 0.01\%$ ;  $|\Delta \text{Mn}| \leq 0.03\%$ ;  $|\Delta \text{Si}| \leq 0.03\%$ 。

LF 转坑条件: 精炼时间  $\geq 45$  min, 白渣精炼; 视钢中 [Al] 补喂 Al 线调 [Al] 至 0.06%, 并喂 Ca-Si 线 180 ~ 230 m; 吊包温度第 1 炉钢水 1 615 ~ 1 625  $^{\circ}\text{C}$ , 连拉时钢水温度 1 600 ~ 1 610  $^{\circ}\text{C}$ 。

RH 真空总时间  $\geq 30$  min, 最低真空度 66.65 Pa 以下保持时间 20 min 以上; 真空后加碳化稻壳保温并软吹氩  $\geq 10$  min。LF + RH 处理后的 [H] 为  $1.2 \times 10^{-6}$  (如用 LF + VD 处理, 则 [H] 为  $1.8 \times 10^{-6}$ )。

### 2.3 连铸

水冷设备正常, 管条对中, 喷嘴通畅, 切割设备正常; 中间包烘烤温度  $\geq 1 000$   $^{\circ}\text{C}$ ; 中间包水口对中, 浸入式水口插入钢液深度 100 ~ 120 mm;

R4 级海洋系泊链钢的液相线温度 1 505  $^{\circ}\text{C}$ ; 中间包过热度控制 10 ~ 25  $^{\circ}\text{C}$ ; 全程 Ar 气保护浇铸, 中间包加覆盖剂 100 kg 和适量碳化稻壳保温; 控制中间包钢水量: 中间包钢水量  $\geq 15$  t; 结晶器用 YG2# ( $\text{SiO}_2$ -CaO-C-MgO- $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 保护渣, 保持黑面操作; 液面平稳, 波动  $\pm 2$  mm; 连铸机结晶器冷却水总流量 164  $\text{m}^3/\text{h}$  (内外 45  $\text{m}^3/\text{h}$ , 两侧 37  $\text{m}^3/\text{h}$ ), 二冷段配水量 0.11 L/kg, 二冷区共分为 5 段, 每段水流量分配为 30:20:20:15:15; 铸坯落地缓冷。

### 2.4 轧制

350 mm  $\times$  470 mm 铸坯进炉炉尾温度  $\leq 750$   $^{\circ}\text{C}$ , 均热段温度 1 280 ~ 1 300  $^{\circ}\text{C}$ , 加热总时间  $\geq 5$  h; 850 机组按 7 道次开成 240 mm  $\times$  240 mm 方坯, 再经 750 机组轧制材, 开轧温度  $\geq 1 150$   $^{\circ}\text{C}$ , 终轧温度  $\geq 950$   $^{\circ}\text{C}$ , 钢材收集温度  $\geq 700$   $^{\circ}\text{C}$ 。

钢材热装退火, 进炉温度控制在 250 ~ 500  $^{\circ}\text{C}$ , 退火温度  $680 \pm 10$   $^{\circ}\text{C}$ , 保温时间  $\geq 18$  h。

## 3 检验结果

### 3.1 组织

表5 R4级海洋系泊链钢低倍组织、夹杂物和晶粒度的检验结果

Table 5 Examination results of macrostructure, inclusion and grain size of steel for R4 offshore mooring chain

取样部位	低倍/级							夹杂物/级								晶粒度/级
	偏析	一般疏松	中心疏松	皮下夹杂	点状偏析	缩孔	碳偏析	A		B		C		D		
								细	粗	细	粗	细	粗	细	粗	
头部	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0.5	0	8.0
尾部	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	0.5	0	1	0	0	0	0.5	0	8.0

按船级社规范要求,在连铸头、尾坯成材的Φ140 mm圆钢成品材上取样,按GB/T1979-2001标准评级,材料组织致密,宏观偏析小(表5)。

在连铸头、尾坯所成的钢材上取料,按GB/T10561-1989标准JK图评级,100倍组织结果见表5;由表5可见,钢水经LF+RH双精炼工艺处理后,钢中夹杂物充分上浮,非金属夹杂物级别很低;该钢的晶粒度均匀细小。

### 3.2 机械性能

在连铸头、尾坯所轧成的钢材上取料,试料经920℃ 180 min水淬、620℃ 180 min水淬整体处理,制成Φ14 mm试样,通过INSTRON1186试验机、JB30D低温冲击试验机检验,结果见表6;材料的1/3R(半径)处和心部性能波动较小,成分偏析小,性能均匀稳定;成分设计合理,有较好的屈强比(≤0.92)匹配;性能指标与标准要求相比

表6 R4级海洋系泊链钢的机械性能

Table 6 Mechanical properties of steel for R4 offshore mooring chain

取样部位	$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	$\psi$ /%	屈强比	V型缺口冲击功/J												
						20℃			0℃			-20℃			-40℃			
						20	165	166	166	172	158	163	167	163	153	149	151	
头部	1/3R	789.7	903.1	20.3	67.9	0.87	170	165	166	166	172	158	163	167	163	153	149	151
	心部	772.5	907.9	18.0	59.1	0.85	160	149	141	136	138	136	125	133	124	101	102	100
尾部	1/3R	730.8	904.9	20.0	68.4	0.81	173	187	180	170	162	160	156	159	171	161	155	157
	心部	716.1	856.7	18.5	65.4	0.84	151	153	157	137	134	136	122	139	144	103	109	100
标准要求	≥580	≥860	≥12.0	≥50.0	≤0.92	-	-	-	-	-	-	-	≥100	-	-	-	-	-

有较大富余;在-40℃时冲击功≥100 J。

### 3.3 氢脆试验

在连铸头、尾坯所成钢材上取料,试料经920℃ 180 min水淬、610℃ 180 min水淬整体处理;从钢材心部位置取样制成Φ14 mm试样,其中一根拉伸试样 $Z_1$ 在机加工后1.5 h内进行拉伸,另一根拉伸试样 $Z_2$ 进行250℃盐浴+2 h烘烤处理;通过INSTRON1186试验机,以≤0.000 3/s速率,直至断裂。试验结果见表7;氢脆试验结果良

表7 R4级海洋系泊链钢氢脆检验结果

Table 7 Hydrogen embrittlement examination results of steel for R4 offshore mooring chain

试样编号	取样部位	直径/mm		$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	$\psi$ /%	$Z_1/Z_2$
		断前	断后					
$Z_1$	头部	14.06	7.89	759.5	890.8	21.7	68.5	0.99
$Z_2$	尾部	14.05	7.83	729.5	878.1	17.8	68.9	

好,超过标准 $Z_1/Z_2 \geq 0.85$ 的要求,说明RH的脱氢效果很好。

## 4 结论

大冶特钢采用LF+RH精炼-连铸-连轧工艺生产的R4级海洋系泊链Φ140 mm圆钢的实物质量满足海洋锚链用钢技术标准要求;R4级系泊链Φ140 mm圆钢综合性能稳定,低温冲击韧性好,在-40℃时冲击功≥100 J。

### 参考文献

- 1 Det Norske Veritas. Rules for Classification of Ships 2002, Standard 2-6-Certification of Offshore Mooring Chain
- 2 Bureau Veritas. Rules for the Classification of Steel Ships 2005, 5:NR216
- 3 American Bureau of Shipping. Offshore Mooring Chain 1999
- 4 董杰,孟兆生,杨浩,等. R4级海洋系泊链用热轧圆钢的研制. 莱钢科技,1994(3):25

钱刚(1966-),男,高级工程师,《特殊钢》编委会副主任委员,上海大学毕业,从事特殊钢冶金和工艺研究。