

R3 级海洋系泊链用钢大方坯连铸工艺优化

季克进¹ 陈继红³ 陈君² 王品³ 刘高丽³

(大冶特殊钢股份有限公司,1 质量检验部;2 技术中心;3 四炼钢厂,黄石 435001)

摘要 通过将钢中 Mn 含量从 1.55% ~ 1.65% 提高至 1.75% ~ 1.85%,用 0.25% ~ 0.35% Cr 替代 0.20% ~ 0.25% Ni,并加入 0.01% ~ 0.04% Ti 微合金化;RH 真空精炼以控制 $[N] \leq 80 \times 10^{-6}$ 、 $[O] \leq 15 \times 10^{-6}$;连铸二冷水量由 0.11 L/kg 降至 0.08 L/kg,并改变配水比例,使出坯温度由 620 ~ 680 °C 提高至 700 ~ 750 °C,并采用连铸坯罩冷和钢材缓冷等工艺措施,降低了 R3 级系泊链钢的生产成本,避免了 350 mm × 470 mm 铸坯纵裂的产生,并使钢材的强度和 -20 °C 韧性均满足标准要求。

关键词 R3 级海洋系泊链钢 大方坯连铸 工艺优化

Optimization of Bloom Casting Process for R3 Grade Offshore Mooring Chain Steel

Ji Kejin¹, Chen Jihong³, Chen Jun², Wang Ping³ and Liu Gaoli³

(1 Quality Examination Department; 2 Technology Center; 3 No4 Steelmaking Works, Daye Special Steel Corp Ltd, Huangshi 435001)

Abstract With taking the technology measures such as increasing Mn content in steel from 1.55% ~ 1.65% to 1.75% ~ 1.85%, replacing 0.20% ~ 0.25% Ni in steel by 0.25% ~ 0.35% Cr, adding 0.01% ~ 0.04% Ti for microalloying, controlling $[N] \leq 80 \times 10^{-6}$ and $[O] \leq 15 \times 10^{-6}$ by RH vacuum treatment, decreasing casting secondary cooling water rate from 0.11 L/kg to 0.08 L/kg and modifying water distribution ratio to increase temperature of bloom at outlet from 620 ~ 680 °C to 700 ~ 750 °C, bloom cooling with shielding and bar products slow cooling, the production cost of R3 grade mooring chain steel is reduced, the longitudinal cracks of 350 mm × 470 mm cast bloom are eliminated and the strength and the toughness at -20 °C of products all meet the requirement of standard.

Material Index Steel for R3 Grade Offshore Mooring Chain, Bloom Casting, Process Optimization

系泊链产品主要用于海洋石油开采采用浮式生产系统、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。目前国内连铸生产系泊链 3 个钢级,通过世界知名船级社最大规格 $\Phi 160$ mm 认证的生产厂,有湖北大冶特钢和江阴兴澄特钢。

由于钢材是按实际尺寸整体调质再检验,规格

越大钢材性能越不容易合格,在 2006 年至 2008 年的生产过程中,R3 级别系泊链的 -20 °C 低温冲击功要求很难达到,从 2006 年生产的 15 炉 $\Phi 150$ mm 大规格钢材检验结果来看,仅有 3 炉符合要求,冲击功平均值 68 J。

由于钢材中 Mn 含量高,并且必须加入 Al 作为细化晶粒元素(表 1)。钢材的过热敏感性、回火脆性增大^[1],连铸坯易发生纵裂。2006 年初、2007 年初连铸坯都出现过批量纵裂,总报废量达到 1 600 t。

表 1 R3 级海洋系泊链钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of R3 grade offshore mooring chain steel / %

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
0.27 ~ 0.35	1.40 ~ 1.90	0.17 ~ 0.37	≤0.025	≤0.025	≤0.60	≤0.30	≤0.20	0.02 ~ 0.06

纵裂形貌为连铸坯内弧面沿表面中间部位开裂,长度 0.5 ~ 3.0 m,深 10 ~ 50 mm(图 1a)。连铸坯成材后,裂纹沿纵向延伸(图 1b)。

鉴于以上两个原因造成生产成本高,生产风险大,为使此品种真正应用于大生产并保证产品质量,

对成分进行了重新设计,修订了冶炼、加工工艺。通过提高钢材 Mn 含量、去除贵重合金 Ni、加入微量 Ti 等进行成分优化,加强真空处理降低气体含量、优化连铸配水制度、连铸坯罩冷、钢材缓冷等工艺控制,使连铸 R3 级系泊链成本降低、避免了连铸坯纵裂、

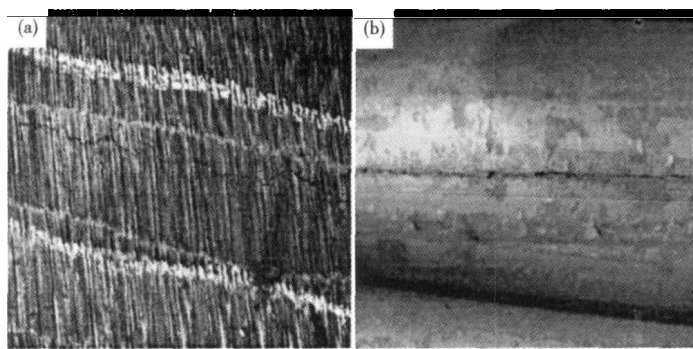


图1 R3级海洋系泊链钢铸坯纵裂(a)和轧材裂纹(b)的形貌
Fig.1 Morphology of longitudinal crack of cast bloom (a) and crack of rolled product (b) of R3 grade offshore mooring chain steel

-20℃低温冲击功性能稳定。

1 连铸主要工艺参数

连铸时目标过热度15~30℃,结晶器水量为164 m³/h(内外弧分别为45 m³/h,两侧分别为37 m³/h)。连铸R3所用大方坯连铸机的主要参数见表2。

表2 大方坯连铸机的主要技术参数
Table 2 Main technical parameters of caster for bloom

项目	参数
弧型方坯连铸机	3机3流
浇铸断面/(mm×mm)	350×470
铸机半径/m	16
钢包容量/t	70
拉坯速度/(m·min ⁻¹)	0.25~0.45

2 产生纵裂的因素

2.1 合金元素对坯、材纵裂的影响

从各化学元素对低温性能的贡献来看,加入Ni或提高Mn含量可提高钢材的淬透性、低温韧性,但由于成本原因,不可能加入Ni来提高钢材的淬透性及低温冲击性能,提高Mn含量伴随而来的是钢材的过热敏感性、回火脆性增大^[1],连铸坯易发生纵裂。因此面临的问题就是如何提高Mn含量而不产生连铸坯纵裂,从而保证生产可行性及性能合格。

2.2 钢的组织和生产工艺对连铸坯纵裂的影响

2.2.1 钢材特性

产生连铸坯纵裂的本质原因是钢的热脆性,是 $\gamma \rightarrow \alpha$ 两相转变和AlN等夹杂物在奥氏体晶界上析出共同作用所引起的。R3要求0.02%以上的酸溶铝,钢中存在AlN夹杂物,AlN在600~800℃析出速度最大,这个温度区间正好与R3冷却时 $\gamma \rightarrow \alpha$ 两

相区转变临界温度 $Ar_1 \sim Ar_3$ (675~810℃)范围相一致。当连铸坯表层温度降低到 Ar_3 时,开始奥氏体向铁素体转变,伴随着相变过程,大约有1%的体积膨胀,因而沿奥氏体晶界产生法向应力,引起原始奥氏体晶界上铁素体的内应力集中,此时AlN也开始沿奥氏体晶界析出,使晶界强度弱化。当热应力与组织应力矢量一致时,其总应力(拉应力)超过晶界强度,便会铸坯产生裂纹^[2],严重时直接使连铸坯沿纵向裂开。实际生产表明,连铸坯在500~600℃最易出现纵裂。

2.2.2 工装设备及生产流向

由于四炼钢厂连铸坯出坯温度低(700~800℃),炼钢厂与轧钢厂之间距离远,不能实现连铸坯直接红装入炉轧制,在红送过程中只要保温工作不到位,温度低于600℃,连铸坯便出现不同程度的纵向裂纹。

3 成分调整及工艺优化

3.1 成分调整

从连铸坯产生纵裂的原因分析中可以看到,减少钢中AlN的析出和提高出坯温度,可尽量避免连铸坯纵裂的发生,钢种要求0.02%~0.06%的酸溶Al,只有通过减少钢水中与Al反应的[N]才能减少AlN的形成,而TiN的析出温度较AlN高^[3],加入微量的Ti生成TiN先析出,同时通过真空处理降低钢水中的[N],可以减少AlN的生成;并且Ti的CN化合物通过固溶体中的溶质拖拽作用、在 γ 晶界的钉扎作用及在变形晶粒内的位错排列作用,使晶粒细化^[4],在热处理时又克服了Mn促进晶粒长大的副作用,降低含Mn钢材的过热敏感性。

降低钢的C含量,提高钢材的韧性及可焊性,同时为提高大规格钢材的淬透性和提高强度加入部分Cr,为节约成本取消钢材中加入0.25%Ni,尽量降低钢中P、S含量。根据以上设计思路确定优化后成分,优化前和优化后R3级系泊链钢的主要化学成分见表3。

表3 优化前和优化后R3级海洋系泊链钢主要化学成分/%
Table 3 Main chemical composition of R3 grade offshore mooring chain steel before and after optimization / %

成分	C	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti
优化前	0.30~0.32	1.55~1.65	≤0.025	≤0.020	-	0.20~0.25	-
优化后	0.28~0.30	1.75~1.85	≤0.015	≤0.010	0.25~0.35	-	0.01~0.04

3.2 工艺措施

冶炼工艺主要措施有:

(1) 增加铁水热装比到 $\geq 60\%$, 减少因废钢带人的 [N] 及其他有害元素含量;

(2) EBT 留钢留渣操作, $P \leq 0.008\%$, 出钢温度 $\geq 1650\text{ }^\circ\text{C}$, 炉后合金化严格控制, 按 2.5~3.0 的碱度配渣料, 保证入 LF 合金及温度进入要求范围, 同时为 LF 争取更长的精炼时间, 使脱 S、合金微调、真空有充分的时间保证;

(3) 以 RH 真空方式为主, 在 67 Pa 下保持时间 $\geq 15\text{ min}$, 降低钢中气体含量, 经检验 [N] 基本控制在 80×10^{-6} 以下, [O] 控制在 15×10^{-6} 以下;

(4) 全程氩气保护连铸, 在保证连铸顺行的前提下降低二冷段配水, 改 5 段配水为 3 段, 提高连铸坯出坯温度(表 4), 并及时收集, 连铸坯用缓冷罩缓冷 48 h, 保证铸坯在 450~650 $^\circ\text{C}$ 缓慢冷却。

表 4 优化前和优化后连铸二冷水量和配比

Table 4 Casting secondary cooling water rate and distribution ratio before and after optimization

工艺	二冷水量/(L·kg ⁻¹)	配比	出坯温度/ $^\circ\text{C}$
优化前	0.11	35:24:17:13:11	620~680
优化后	0.08	40:30:30	700~750

轧制工艺主要措施有:

(1) 连铸坯炉尾进炉温度 $\leq 800\text{ }^\circ\text{C}$, 均热段炉温 $(1260 \pm 10)\text{ }^\circ\text{C}$, 加热总时间 $\geq 4.5\text{ h}$; 保证铸坯加热均匀及温度均匀;

(2) 钢材及时收集, 收集温度 $\geq 600\text{ }^\circ\text{C}$, 并进行红装退火或先入缓冷坑缓冷后再退火。

4 工艺优化效果

2008 年~2009 年冶炼 R3 级系泊链用钢和成分类似的 CM690 钢种约 19 000 t, 纵裂产生 12 t, 废品率为万分之六, 基本杜绝了连铸坯纵裂的发生。

表 5 优化后 R3 级海洋系泊链钢的力学性能

Table 5 Mechanical properties of R3 grade offshore mooring chain steel after optimization

项目	$R_{p0.2}$ / MPa	R_m / MPa	A/ %	Z/ %	$R_{p0.2}$ / R_m	-20 $^\circ\text{C}$ 冲击功 A_{KV}/J	
标准	≥ 410	≥ 690	≥ 17	≥ 50	≤ 0.92	平均 ≥ 100 最小单值 ≥ 80	
最小值	494	709	20.3	63.8	0.654	100	90 86
最大值	605	762	23.5	69.7	0.785	184	165 172
平均	540.6	744.7	21.8	66.6	0.726	136.7	116.5 132.0

统计了 2007 年~2009 年 69 炉规格从 $\Phi 78 \sim 140\text{ mm}$ R3 级系泊链用钢的力学性能(表 5)。

从表 5 可见, 所有炉号钢材全部经美国 ABS 船级社检验合格, 从性能结果来看, 钢材强度富余 50 MPa、冲击功富余 30 J 左右, 钢材完全满足用户及各船级社规范。

5 结束语

(1) 通过加入微量 Ti 使 TiN 较 AlN 提前析出, 并加强真空降低 [N] 使 AlN 析出减少, 加强保温措施, 避免了 R3 级系泊链钢连铸坯发生纵裂。

(2) 通过提高 Mn 含量, 取消贵重金属 Ni, 既降低了钢材成本, 同时又能保证大规格 R3 级系泊链钢材的性能稳定并符合标准要求。

参考文献

- 1 大连理工. 金属学与热处理. 北京: 科学出版社, 1975
- 2 杜显彬, 周平, 朱伟华. M30Mn2 锚链钢连铸坯表面裂纹原因分析. 山东冶金, 2003, 25(6): 52
- 3 黄杰. 微合金钢碳、氮化合物平衡析出温度的迭代计算. 上海金属, 2005(3): 47
- 4 王祖滨, 东涛. 低合金高强度钢. 北京: 原子能出版社, 1996

李克进(1961-), 男, 工程师, 1983 年本溪冶金专科学校毕业, 钢材产品生产过程质量控制研究。

收稿日期: 2009-06-26

· 简讯 ·

2009 年全国特钢冶炼学术研讨会暨大电炉协调组年会在青岛召开

2009 年特钢年会于 9 月 10~13 日在山东青岛召开。会议由中国金属学会特钢专业委员会特钢冶炼学术委员会主办, 莱芜钢铁股份有限公司协办。会议主题是“适应特钢企业的技术发展, 提高特钢产品质量, 强化节能减排意识”。参加年会的企业、大学、科研院所及相关行业共有 50 余家, 与会代表近百人。山东钢铁集团公司总经理任浩参加了会议。会议共收到学术论文 60 余篇。

会议特邀中国钢铁工业协会顾问、原冶金工业部副部长吴建常作了“中国电炉炼钢的发展与技术进步”的报告; 中国

金属学会副秘书长苏天森提出了“钢铁形势与冶金工程技术学科的发展方向”; 中国废钢铁应用协会秘书长闫启平分析了中国废钢铁市场发展趋势; 兴澄特钢原总工程师蔡燮整介绍了我国特殊钢现状及发展战略思考; 冶金工业信息标准研究院苏亚红展望了世界特殊钢发展动态。

参加会议的代表介绍了各自单位的研究成果并进行了学术交流。中国金属学会特钢专业委员会副理事长、北京科技大学教授李士琦最后作总结发言。会后部分与会代表赴莱钢特钢厂参观。(大电炉协调组)