

· 工艺技术 ·

50 t EAF-LF(VD)-CC 流程开发 4130 钢 Φ350 mm 连铸圆坯的生产实践

李法兴

(山东钢铁股份有限公司莱芜分公司特钢事业部, 莱芜 271104)

摘要 采用 50 t EAF-LF(VD)-CC-缓冷工艺, 通过控制电弧炉终点 [C] 0.12% ~ 0.25%, 终点 [P] ≤ 0.015%, 出钢预脱氧和合金化, LF 精炼时采用 CaO-Al₂O₃ 系无氟预熔精炼渣, 以及连铸综合铸坯控制技术包括钢水深度 ≥ 800 mm 19 t 中间包, 控制拉速 0.35 ~ 0.45 m/min, 钢水过热度 15 ~ 25 °C, 优化二冷制度和末端电磁搅拌参数 (350 A/8 Hz) 等工艺措施, 所生产的 4130 钢 (/% : 0.29 ~ 0.31C, 0.25 ~ 0.28Si, 0.51 ~ 0.54Mn, 0.96 ~ 0.98Cr, 0.19 ~ 0.20Mo, 0.016 ~ 0.025Al) Φ350 mm 连铸圆坯的 [O]、[N] 分别为 (12 ~ 14) × 10⁻⁶、(55 ~ 70) × 10⁻⁶, 低倍组织 ≤ 1.0 级, 锻件的非金属夹杂物 A、B ≤ 1.0 级、C、D ≤ 0.5 级, 锻件超声波探伤级别、尺寸公差及表面质量等质量指标均满足用户要求。

关键词 50 t EAF-LF(VD)-CC 流程 4130 钢 圆坯 生产实践

Practice of Pilot Production on Φ350 mm Cast Round Bloom of Steel 4130 by 50 t EAF-LF (VD)-CC Flow Sheet

Li Faxing

(Special Steel Division, Laiwu Branch, Shandong Iron and Steel Co Ltd, Laiwu 271104)

Abstract With using 50 t EAF-LF(VD)-CC-slow cooling process, controlling EAF end [C] 0.12% ~ 0.25% and end [P] ≤ 0.015%, pre-deoxidizing and alloying in tapping, using CaO-Al₂O₃ free fluorine pre-melting refining slag, and integrate casting control technology including 19 t tundish with liquid depth ≥ 800 mm, casting speed 0.35 ~ 0.45 m/min, liquid overheating extend 15 ~ 25 °C, optimum secondary cooling schedule and F-EMS parameter (350 A/8 Hz) etc. for steel 4130 (/% : 0.29 ~ 0.31C, 0.25 ~ 0.28Si, 0.51 ~ 0.54Mn, 0.96 ~ 0.98Cr, 0.19 ~ 0.20Mo, 0.016 ~ 0.025Al) Φ350 mm casting round bloom the [O] and [N] are respectively (12 ~ 16) × 10⁻⁶ and (55 ~ 70) × 10⁻⁶, the rating of macrostructure ≤ 1.0, and in forged bar the rating of nonmetallic inclusion A and B ≤ 1.0, C and D ≤ 0.5, the rating of ultrasonic detection, dimension tolerance and surface quality of forgings all meet the requirement of user.

Material Index 50 t EAF-LF (VD)-CC Flow Sheet, Steel 4130, Round Bloom, Production Practice

中碳 Cr-Mo 系调质合金结构钢 ASTM 4130 因具有高比强、高硬、高韧、良好淬透性、易加工等优良的使用性能和加工性能。随着石油工作迅速发展, 油井开发向深井、超深井、大位移井等方向发展, 因此对石油套管连接件(套管接头、三通、四通、六通、阀体等)用钢提出了更高的要求, 4130 钢已成为石油套管连接件用钢常用钢种^[1-3]。

1 生产工艺流程及主要设备参数

Φ350 mm 石油套管连接件用 ASTM 4130 连铸圆坯生产工艺流程为: 配料→50 t UHP 电弧炉→50 t LF 精炼炉→60 t VD→R11 m 合金钢连铸机→入坑缓冷→检验→精整、修磨→计量→入库。主要设备参数见表 1、表 2。

2 主要质量控制措施、控制要点

2.1 强化电弧炉终点控制

控制终点碳 0.12% ~ 0.25%、终点磷 ≤ 0.015%, 出钢温度 1 620 ~ 1 680 °C, 出钢过程顺钢流, 根据实际终点 C 含量, 提前加入适量碳粉; 渣料加入 10 ~ 15 kg/t_钢, 钢芯铝加入 1.0 ~ 2.0 kg/t_钢; 以

表 1 电弧炉和钢包炉主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of arc furnace and ladle furnace

EAF		LF	
项目	参数	项目	参数
冶炼周期/min	42	钢包处理量/t	52
平均容量/t	52	钢包直径/mm	2 618
炉料构成	30% ~ 60% 废钢 + 70% ~ 40% 铁水	自由空间/mm	400
变压器容量/MVA	35	变压器容量/MVA	15
电极直径/mm	500	电极直径/mm	300
电耗/(kWh · t ⁻¹)	249	升温速度/ (°C · min ⁻¹)	3
电极消耗/(kg · t ⁻¹)	1.30		
氧耗/(m ³ · t ⁻¹)	53		
产量/(万 t · a ⁻¹)	60		

表 2 连铸机主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of continuous caster

项目	参数
机型	全弧型
中间包容量/t	19
铸坯断面/mm	260 × 300、180 × 220、Φ280、Φ350
弧形半径/m	12
机数 × 流数	3 × 3
流间距/mm	1 600
连铸拉速/(m · min ⁻¹)	0.6 ~ 0.75 (260 mm × 300 mm) 1.0 ~ 1.30 (180 mm × 220 mm) 0.70 ~ 0.95 (Φ280 mm) 0.30 ~ 0.50 (Φ350 mm)
铸坯定尺长度/m	2.7 ~ 6
结晶器振动方式	液压
结晶器形式	弧形管式
铜管长度/mm	800
振幅/mm	2.5
二冷方式	气-雾冷却
电磁搅拌	M-EMS + F-EMS
矫直方式	嵌式、五机架连续矫直
平均作业率/%	>90
连浇炉数	>60
平均浇注时间/min	42

表 3 调整后精炼渣成分和碱度

Table 3 Ingredient and basicity of adjusted refining slag

化学成分/%						碱度
CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	P	S	(R)
50 ~ 60	8 ~ 12	5 ~ 8	20 ~ 28	0.005 ~ 0.007	0.4 ~ 0.6	4 ~ 5

充分利用碳粉脱氧、起泡的双重作用及钢渣混冲成渣,降低钢液初始氧含量,完成钢液的预脱氧及合金化,为精炼创造良好条件。

2.2 改进电弧炉炉后调渣制度及精炼渣组成

改进原有的 LF 精炼渣系,使用 CaO-Al₂O₃ 系无氟预熔精炼渣,以改进精炼渣冶金性能,提高精炼效果:电弧炉出钢向钢包中加入预熔调渣剂 300 kg/炉,石灰 300 kg/炉;根据到位渣况,适时调整加入适量调渣剂(石灰、碳化硅、碳粉、铝线)等调整炉渣流动性和还原性,保持白渣操作时间 ≥ 20 min。调整后精炼渣成分见表 3。

2.3 窄成分控制

通过在电弧炉炉后平台车安装计量衡,准确计量钢包中钢水含量;在炉后出钢过程中加入适量增碳剂、钢芯铝预脱氧及其它相应合金进行合金化;LF 精炼到位时,将 C、Mn、Cr、Mo 等钢中主要成分调整至规格下限;钢水到精炼位后,根据到位炉渣状况,调整扩散脱氧剂(碳化硅和碳粉)加入量,保持炉渣流动性;温度和渣况等具备取样分析条件,取一次样全分析前,喂入铝线强脱氧,确保一次样 Alt 含量为 0.040% ~ 0.060%;LF 精炼出钢后入 VD 前进行扒渣操作,扒渣量控制 1/3 ~ 3/5,优化底吹氩搅拌制度等

措施精确控制钢中成分。钢成分的波动范围(/%): ±0.01C、±0.03Si、±0.02Mn、±0.02Cr、±0.01Mo。

2.4 连铸

采用综合铸坯质量控制集成技术^[4],保证高洁净度、致密、均质连铸圆坯生产^[5]。

2.4.1 提高钢包水口自开率,采用大容量、深熔池中间包

通过采取调整引流砂成分、粒度及加强对钢包水口清理等措施,使钢包水口自开率 ≥ 98%。采用 T 型大容量的中间包,保持熔池深度 ≥ 800 mm,容量 ≥ 19 t;换包时稳定中间包液面及拉速;注流区设置新型中间包滞流控制器、挡墙等控流组件,优化中间包流场,使钢水在中间包停留时间 ≥ 10 min,促进夹杂物上浮。

2.4.2 无氧化、全保护浇注

通过钢包 → 中间包采用注流水口 + 石棉垫 + 吹氩保护,中间包 → 结晶器采用浸入式水口 + 石棉垫保护浇注及中间包加盖密封保护;中间包盖烘烤孔、加料孔、浇注孔安装吹氩预制件;开浇前用 Ar 气排除中间包内的空气,中间包钢液面加碳化稻壳和保护渣双层保温,结晶器钢液面使用保护渣覆盖等措施,避免钢液二次氧化。

2.4.3 恒拉速、低过热度浇注和优化二冷制度

拉速控制 0.35 ~ 0.45 m/min,同炉次拉速波动 ≤ 0.02 m/min,相邻炉次拉速波动 ≤ 0.03 m/min;钢水过热度 15 ~ 25 °C,同炉次钢水过热度波动 ≤ 5 °C。

通过取消连铸二冷段第 5 区的冷却,改变喷嘴布置方式等措施,优化二冷制度;控制铸坯表面温降 ≤ 150 °C/m、表面返温 ≤ 85 °C/m,确保进拉矫机前表面温度 ≥ 920 °C,以提高圆坯内部质量。ASTM 4130 Φ350 mm 连铸圆坯二冷段喷嘴布置及二冷比水量、分配比例见表 4。

2.4.4 优化 F-EMS 参数

连铸采用 F-EMS,通过参数优化设置(350 A/8 Hz)可使铸坯等轴晶率提高 10% ~ 20%,明显改

表 4 二冷段喷嘴布置方式和比水量分配

Table 4 Nozzle arrangement and water distribution in secondary cooling zone

冷却区	每流数量 (件 × 排)	喷射角度/°	二冷区分配 比例/%
0	6 × 3	75	40
1	4 × 2, 4 × 2	90, 90	25
2	4 × 3, 4 × 2	90, 90	17
3	4 × 3, 4 × 2	80, 65	10
4	4 × 3, 4 × 2	80, 65	8

注:1~4 区位置 45° 旋转,比水量 0.35 ~ 0.45 L/kg。

表5 4130 钢化学成分和气体含量
Table 5 Chemical composition and gas content of steel 4130

项目	化学成分/%								气体/ 10^{-6}	
	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P	Al	O	N
协议	0.28~0.33	0.20~0.35	0.45~0.60	0.90~1.10	0.17~0.25	≤ 0.025	≤ 0.025	0.015~0.040	≤ 16	
内控	0.29~0.32	0.25~0.35	0.50~0.55	0.95~1.10	0.17~0.25	≤ 0.020	≤ 0.015	0.015~0.040	≤ 16	
检验值	0.29~0.31	0.25~0.28	0.51~0.54	0.96~0.98	0.19~0.20	≤ 0.008	≤ 0.015	0.016~0.025	12~14	55~70

表6 4130 钢连铸圆坯的尺寸公差

Table 6 Dimension tolerance of steel 4130 round casting bloom

项目	协议值	实测值
直径公差	$\pm 1.2\% d$	$0.18\% \sim 0.65\% d$
不圆度	$\leq 2\% d, \leq 6 \text{ mm/m}$	$0.30\% \sim 0.82\% d, 1.5 \sim 2.6 \text{ mm/m}$
弯曲度	总弯曲度 $\leq 0.6\%$	0.35%
长度公差	$0 \sim +80 \text{ mm}, \leq 4\% d$	$5 \sim +50 \text{ mm}, 0.42\% \sim 1.42\% d$
切斜度	$\leq 15 \text{ mm}$	$5 \sim 10 \text{ mm}$

注:d 公称直径

善中心偏析、中心疏松并避免出现缩孔。

2.4.5 合理设计矫直压力,圆坯铸后缓冷

因采用4架3点矫直,易造成拉矫机压力过大,使圆坯内弧面压痕深、铸坯产生芯部裂纹;减少拉矫机压力后又存在因拉矫机压力偏小出现铸坯下滑现象等实际问题;通过将拉矫系统改造为5机架连续矫直,合理调整每架拉矫机的工作压力(4 MPa),减轻圆坯压痕深度和椭圆度及将圆坯转入缓冷坑加盖保温缓冷,确保缓冷时间 $\geq 36 \text{ h}$,出坑温度 $\leq 250 \text{ }^\circ\text{C}$ 等措施,保证钢中气体扩散、减少圆坯组织应力、热应力、避免内裂。

3 圆坯实物质量分析

3.1 化学成分

石油套管连接件用 ASTM 4130 化学成分检验值见表5。从表5可以看出,生产过程能够按照内控成分要求,严格控制钢中各元素含量,C、Si、Mn、Cr、Mo等钢中主要元素化学成分控制稳定,实现窄成分控制;氧、氮含量较低,分别达 $(12 \sim 14) \times 10^{-6}$ 、 $(55 \sim 70) \times 10^{-6}$, $P \leq 0.015\%$ 、 $S \leq 0.008\%$,控制在较低水平;钢中铝含量在 $0.016\% \sim 0.025\%$,为圆坯综合性能的提高提供了保证。

3.2 尺寸公差及表面质量

圆坯尺寸公差见表6。圆坯表面质量协议值为:表面无目视可见的结疤、气孔、针孔、重皮及深度 $\geq 1 \text{ mm}$ 裂纹,允许深度 $\leq 3 \text{ mm}$ 的凹坑、机械划伤、压痕存在。表面无缺陷比例 $\geq 98\%$ 。

圆坯实测值为:表面主要存在与保护渣相关的渣坑、渣沟、深度 $\leq 2 \text{ mm}$,无目视可见的结疤、气孔、针孔、重皮、裂纹。表面无缺陷比例 $\geq 99\%$ 。

3.3 圆坯低倍组织

连铸圆坯酸浸低倍组织检验结果表明,圆坯疏松、偏析、缩孔、中间及中心裂纹均在1.0级以下,不存在皮下裂纹及皮下气泡缺陷,铸坯致密性、均匀性较好,符合协议要求。

3.4 锻件的非金属夹杂物和无损检验

连铸圆坯锻后(锻压比 ≥ 4)的锻件非金属夹杂物检验结果表明,锻件的非金属夹杂物A、B类控制在1.0级以下,C、D类在0.5级以下,圆坯洁净度较高。

连铸圆坯锻后(锻压比 ≥ 4)锻件探伤协议要求为:保证锻压比 ≥ 4 的情况下,需方对成品锻件按 GB/T6402-2008 标准进行全截面100%超声波探伤检验,合格级别 ≥ 2 级。锻件实测结果为:锻压比 ≥ 4 的情况下,需方对成品锻件按 GB/T6402-2008 标准进行全截面100%超声波探伤检验,合格级别 ≥ 3 级。

4 结论

莱芜分公司特钢事业部电弧炉流程生产 $\Phi 350 \text{ mm}$ 石油套管连接用 ASTM 4130 连铸圆坯的主要质量控制措施及控制要点合理,化学成分控制稳定,圆坯组织均匀,洁净度高,主要性能指标完全满足相关协议及用户使用要求。

参考文献

- [1] 周振丰,张文铖. 焊接冶金与金属焊接性[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- [2] 李宏伟,李立英,韩涛,等. ASTM 4130 钢的局部脆化研究[J]. 压力容器,2010(10):16-20.
- [3] 钱旭瑞,薄国公. 海洋平台 30CrMo 调质钢管焊接[J]. 金属加工,2011(6):44-45.
- [4] 何庆文,毛成杰,王广连,等. 260 mm \times 300 mm 合金钢连铸坯质量控制集成技术开发和应用[J]. 特殊钢,2011,32(2):27-29.
- [5] 仝太钦,王忠英,孙志祥,等. 淮钢特殊钢大圆坯连铸工艺装备特点及生产实践[J]. 连铸,2008(3):9-12.

李法兴(1978-),男,硕士,工程师,2007年西安建筑科技大学毕业,特殊钢新产品开发和工艺技术研究。

E-mail:lfxwgp@126.com

收稿日期:2013-03-25