

## 改善 2Cr13 马氏体不锈钢 150 mm × 150 mm 连铸坯 表面质量的工艺实践

张迎春<sup>1,2</sup> 成国光<sup>1</sup> 钱国余<sup>1</sup> 刘敬军<sup>2</sup> 贾育华<sup>2</sup> 邱永田<sup>2</sup>

(1 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083;2 邢台钢铁有限责任公司炼钢厂,邢台 054027)

**摘要** 2Cr13 不锈钢(∕% : 0.16 ~ 0.25C, ≤1.0Si, ≤1.0Mn, ≤0.035P, ≤0.030S, 12.0 ~ 14.0Cr) 150 mm × 150 mm 铸坯生产流程为铁水预处理-50 t AOD-LF-CCM, 缓冷, 退火, 修磨。工业性试生产结果表明, 通过采用粘度(0.58 ± 0.1) Pa · s, 碱度 0.95 ± 0.01, 熔点波动范围 5 °C 的结晶器保护渣, 拉速从 1.3 m/min 降至 1.1 m/min, 振幅从 3 mm 提高到 5 mm, 振动频率从 139 次/min 减到 137 次/min, 钢水过热度从 35 °C 降至 20 ~ 30 °C, 铸坯收得率达 94.07%, 消除了铸坯纵向凹陷和裂纹, 铸坯缓冷后可直接轧制, 可省去铸坯退火、修磨两道工序, 降低了生产成本。

**关键词** 2Cr13 马氏体不锈钢 铁水预处理-50 t AOD-LF-CCM 150 mm × 150 mm 连铸坯 表面质量

### Process Practice of Improvement on Surface Quality of 150 mm × 150 mm Casting Billet of Martensite Stainless Steel 2Cr13

Zhang Yingchun<sup>1,2</sup>, Cheng Guoguang<sup>1</sup>, Qian Guoyu<sup>1</sup>, Liu Jingjun<sup>2</sup>, Jia Yuhua<sup>2</sup> and Di Yongtian<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology, Beijing 100083;

2 Steelmaking Works, Xingtai Iron and Steel Co Ltd, Xingtai 054027)

**Abstract** The flow sheet for production of 150 mm × 150 mm casting billet of stainless steel 2Cr13 (∕% : 0.16 ~ 0.25C, ≤1.0Si, ≤1.0Mn, ≤0.035P, ≤0.030S, 12.0 ~ 14.0Cr) is hot metal pretreatment-50 t AOD-LF-CCM, slow cooling, annealing and grinding. Commercial pilot production results show that with the technology measures including using mold powder with viscosity (0.58 ± 0.1) Pa · s, basicity 0.95 ± 0.01, and melting point fluctuating extent 5 °C, casting speed decreasing from 1.3 m/min to 1.1 m/min, mold oscillation amplitude increasing from 3 mm to 5 mm, oscillation frequency decreasing from 139 times/min to 137 times/min and liquid superheating extent decreasing from 35 °C to 20 ~ 30 °C, the surface longitudinal depression and crack are eliminated and the yield of billet is up to 94.07%, the low-cooled billets can direct-roll to save both procedure of billet annealing and grinding and decrease the production cost.

**Material Index** Martensite Stainless Steel 2Cr13, Hot Metal Pretreatment-50 t AOD-LF-CCM, 150 mm × 150 mm Casting Billet, Surface Quality

2Cr13 马氏体不锈钢广泛应用于泵轴、轴套、叶轮、叶片、紧固件等既有一定耐蚀性要求又要承受引力较高的零部件领域<sup>[1-2]</sup>。因该钢种成分设计的特点,在凝固过程中存在着严重的包晶反应<sup>[3-6]</sup>,致使铸坯表面易出现凹陷、裂纹等缺陷,甚至引起漏钢等事故<sup>[7]</sup>

邢台钢铁有限责任公司(邢钢)于 2011 年开发以铁水为主要原料生产 2Cr13 系列不锈钢的工艺,并引进 1 台 4 机 4 流 150 mm × 150 mm 方坯连铸机。在开发 2Cr13 钢时,同样出现了开浇漏钢、严重的铸坯凹陷、裂纹等问题。本文就相关工艺参数对 2Cr13 钢铸坯表面质量的影响进行研究。

#### 1 2Cr13 不锈钢冶炼流程及连铸工艺参数

邢钢 2Cr13 钢的生产工艺流程为:高炉铁水→铁水预处理(脱硅、脱磷)→50 t AOD→50 t LF→CCM→铸坯缓冷→铸坯退火→摊检、修磨→轧制。

连铸机主要参数见表 1。2Cr13 不锈钢化学成分范围(GB/T4356-2002)和试验钢分析成分见表 2。

表 1 方坯连铸机的主要工艺参数

Table 1 Main technical parameters of billet casting machine

项目	参数
机型	弧型
流数	4 机 4 流
铸机半径/m	9
结晶器锥度/(% · m <sup>-1</sup> )	1.32
结晶器振幅/mm	±2 ~ ±9
结晶器振动频率/cpm	40 ~ 300
二次冷却	4 段汽雾冷却
冶金长度/m	~20.3

表 2 2Cr13 不锈钢的化学成分范围 /%

Table 2 Chemical composition of stainless steel 2Cr13 /%

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr
标准	0.16 ~ 0.25	≤1.0	≤1.0	≤0.035	≤0.030	12.0 ~ 14.0
试验钢	0.19	0.32	0.24	0.023 5	0.003 5	12.15

## 2 2Cr13 不锈钢小方坯缺陷特征

图1(a)显示的是铸坯侧面的纵向凹陷,如黑色箭头所示,凹陷的深度在3 mm左右,其长度可以达到1 m以上。当这种凹陷更严重时会展成为纵向裂纹,从而引起漏钢事故,如图1(b)中的箭头所示。

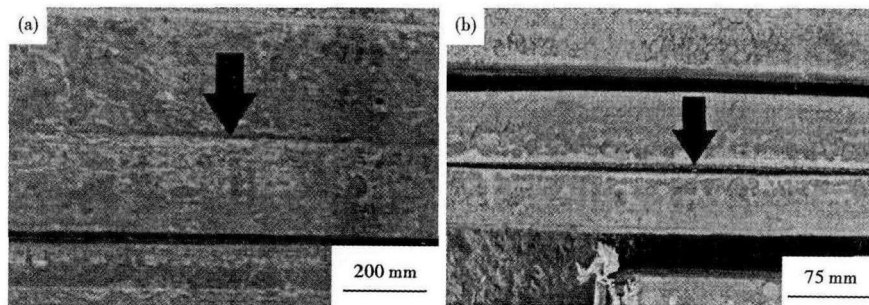


图1 2Cr13 钢 150 mm × 150 mm 铸坯表面缺陷形貌:(a)纵向凹陷;(b)纵向裂纹  
Fig.1 Morphology of 150 mm × 150 mm casting billet surface defects of steel 2Cr13: (a) longitudinal depression; (b) longitudinal crack

图1 连铸的主要工艺参数为:中间包开始过热度 35 ℃,拉速 1.3 m/min,结晶器冷却水量 90 m<sup>3</sup>/h;二冷比水量 0.22 L/kg<sub>钢</sub>,保护渣成分见表3。

因2Cr13 不锈钢这个钢种的特点常常会导致铸坯冷却过程中发生马氏体转变而存在内应力,铸坯不退火根本无法对表面缺陷进行修磨。

2Cr13 不锈钢之所以出现此类表面缺陷,首先是因为  $\delta \rightarrow \gamma$  在转变凝固过程中产生了体积收缩,引起坯壳内钢液体积的变化,诱导结晶器液面的波动,最后结晶器内弯月面钢液面的波动诱导了横向凹陷的产生,该缺陷反过来又导致结晶器内保护渣的不均匀渗入,这一现象在铸坯表面中心处更为突出,从而导致纵向中心凹陷的产生,在凹陷的底部往往存在着很细的偏析线,严重时在铸坯表面形成中心纵向裂纹<sup>[8-9]</sup>。

邢钢本着“低温弱冷”的思路,从改变浇铸的过热度及拉速以及改进保护渣性能上做了大量的工业试验研究。此外,还结合邢钢方坯连铸机的结晶器振动机构整体采用了 VAI Dynaflex 技术,可以实现在线变化波形、振幅和频率要求这一特点,将结晶器的振动频率从 139 次/min 减至 137 次/min,同时将振幅从 3 mm 提高到 5 mm。通过以上综合因素的调试来考察铸坯表面情况的变化。

## 3 讨论

### 3.1 工业改进方案设计

过热度-考虑到浇铸过程中可能出现结流的风险和铸坯质量的需要,中间包过热度控制在 20 ~ 35 ℃。

表3 原结晶器保护渣的主要成分 / %

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	F <sup>-</sup>	Na <sub>2</sub> O	Li <sub>2</sub> O	C
29.2	35.4	1.2	3.1	2.5	1.8	8.3	2.5	11.1

保护渣-针对此类钢使用小方坯生产,根据王文学等人<sup>[10]</sup>推荐的保护渣理化指标范围,试验开始时选用了 A 渣,后来结合邢钢的具体条件适当做了优化,即 B 渣。保护渣的具体成分和理化指标见表4。

拉速-考虑到拉漏的风险最大取 1.3 m/min,考察范围 1.1 ~ 1.3 m/min。

结晶器振动参数- $f$ (结晶器振动的频率) 137 ~ 139 次/min,  $S$ (结晶器振动的振幅) 3 ~ 5 mm。

具体试验的方案见表5。

### 3.2 结果分析

试验1进行了低过热度浇铸,虽然解决了开浇纵裂漏钢的问题,但浇至 18 t 时两个流出现纵裂漏钢,因浇铸时间变长,最后结流停浇,20 t 钢水回炉,铸坯缓冷、退火及修磨后收得率仅 23.62%。

试验2因担心漏钢,为了提高坯壳出结晶器的强度,将拉速降到 1.2 m/min,同时考虑到振动对结晶器壁液态保护渣渗入的影响,将振幅稍稍进行了放大,同时将振动频率较试验1降低,效果明显,立即解决了纵裂的问题,铸坯缓冷、退火修磨后收得率提高至 77.91%,但铸坯表面仍有凹陷存在。

试验3在试验2的启发下,继续将拉速降低,并调整结晶器振动参数,同时略将保护渣碱度提高,使

表4 试验结晶器 A、B 保护渣的主要成分和理化指标 / %

Table 4 Main ingredient and physical-chemical index of test mold powder A and B / %

渣号	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	F <sup>-</sup>	Na <sub>2</sub> O	Li <sub>2</sub> O	C	$\eta_{1300\text{ }^\circ\text{C}} / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	熔化温度 / ℃	碱度	转折温度 / ℃	铺展角 / °	粒度分布 (40~80目) / %
A	32.8	36.5	1.0	2.8	2.8	1.6	5.2	1.8	10.3	0.55 ± 0.1	1 123 ± 50	0.9 ± 0.1	1 205 ± 5	31.9	75
B	35.3	37.1	1.0	1.3	2.3	0.8	6.9	0.2	10.3	0.58 ± 0.1	1 140 ± 5	0.95 ± 0.05	1 215 ± 5	30.2	86

表 5 试验浇铸工艺参数  
Table 5 Test casting process parameters

试验	过热度/ ℃	保护渣	拉速/ ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	结晶器振动	
				频率/ ( $\text{次} \cdot \text{min}^{-1}$ )	振幅/mm
1	20~30	A	1.3	139	3
2	25~35	A	1.2	138	4
3	20~30	B	1.1	137	5

注:结晶器液面波动  $\pm 3$  mm;电磁搅拌:电流 370 A,频率 4 Hz;结晶器冷却水流量  $90 \text{ m}^3/\text{h}$ ;二冷比水量  $0.22 \text{ L}/\text{kg}_{\text{钢}}$ ,三次试验相同。

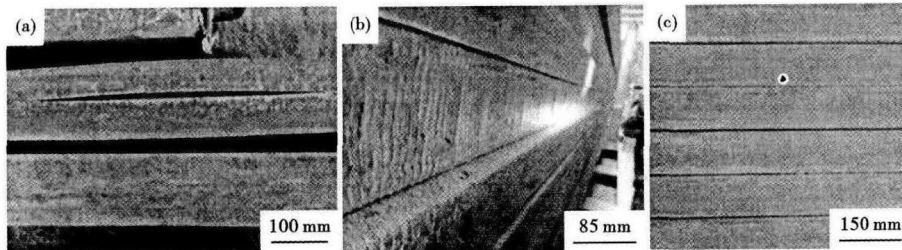


图 2 试验 1(a)、2(b)和 3(c)的 2Cr13 钢铸坯表面形貌

Fig. 2 Morphology of surface casting billet of steel 2Cr13 produced by improving test process: (a) test 1; (b) test 2; and (c) test 3

用了稳定性较好的 B 渣,采取上述措施后问题得到了彻底的改善;铸坯缓冷后摊检,不修磨可满足轧制要求,从而节省了退火和修磨两道工序,铸坯收得率达到 94.07%,根据试验 3 可以预测 6 炉连浇铸坯收得率能达到 96.88%。3 次试验铸坯表面形貌见图 2。

从 3 次工业试验可以看出:随着拉速的降低,结晶器弯月面附近的冷却减弱,坯壳的凝固生长沿结晶器纵向下移,是保证铸坯表面质量的工艺因素;同时因铸坯在结晶器里的停留时间变长,从而坯壳的强度增加,抵御变形的能力提高。

此类钢选较高黏度的保护渣是保证结晶器壁液态保护渣层均匀的理化条件。虽然 A 和 B 两种渣

均可满足条件,但 B 渣的作用效果明显好于 A 渣,主要是因为 B 渣的熔点和碱度变化范围均比 A 渣要小,从而保证了 B 渣的稳定性要比 A 渣好,且 B 渣的碱度略比 A 渣高,使得 B 渣的结晶倾向增大,更有利于结晶器的弱冷。

因拉速是和结晶器振动相匹配的,针对这类钢必须选择合适的振动参数与拉速匹配,以保证合适的负滑脱时间和合适的保护渣消耗和结晶器弱冷,这是实现铸坯表面无缺陷的前提。

#### 4 结论

(1) 在使用低粘度 ( $0.55 \pm 0.1$ )  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 、低碱度 ( $0.90 \pm 0.1$ ) 且熔点温度波动较大(波动范围  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 的 A 保护渣条件下,降低过热度  $20 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$  可以解决开浇铸坯纵裂问题,然而随着浇

铸进行仍然会有纵裂漏钢出现,铸坯缓冷退火修磨后收得率仅为 23.2%;在此基础上降低拉速至  $1.2 \text{ m}/\text{min}$ ,且适当调高振幅和降低振动频率可明显解决纵裂问题,使得铸坯缓冷、退火修磨后的收得率大幅度提高至 77.91%。

(2) 在低过热度条件下将 A 保护渣更换为具有较高粘度 ( $0.58 \pm 0.1$ )  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 、低碱度 ( $0.95 \pm 0.01$ ) 且熔点温度波动较小(波动范围  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 的稳定性较好的 B 保护渣后,并进一步降低拉速至  $1.1 \text{ m}/\text{min}$  同时进一步适当调高振幅 ( $5 \text{ mm}$ ) 并降低振动频率 ( $137 \text{ 次}/\text{min}$ ),由此得到铸坯不修磨可满足轧制要求,从而节省了退火和修磨两道工序,铸坯收得率提高到 94.07%。

#### 参考文献

- [1] 张学元,王凤平,陈卓元,等. 油气开发中二氧化碳腐蚀的研究现状和趋势[J]. 油田化学,1997,14(2):190-196.
- [2] 徐文亮,唐豪清,孙元宁. 合金元素对 2Cr13 马氏体不锈钢组织及性能的影响[J]. 宝钢技术,2008(5):39-43.
- [3] Zhang W, Yao J, Peng W. Research on Microstructure and Properties of 2Cr13 Stainless Steel Parts Made by Laser Direct Metal Deposition [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008(1):1830-1835.
- [4] Xu W, Tang H, Sun Y. Influence of Alloy Elements on Microstructure and Properties of 2Cr13 Martensitic Stainless Steel [J]. Baosteel Technology, 2008(5):39-43.
- [5] Moustafa I M, Bagoury N E, Ammar M I. Solidification Mechanism of Martensitic Stainless Steel [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2001, 28: 5-12.
- [6] 邢文彬,许诚信. 影响不锈钢连铸坯质量的几个因素[J]. 北京科技大学学报,1991,13(4):49-56.
- [7] 张卫红. 2Cr13 马氏体不锈钢铸坯表面纵裂控制[J]. 连铸,2007(6):39-40.
- [8] Guyot V, Martin J. Control of Surface Quality of  $0.08\% < C < 0.12\%$  Steel Slabs in Continuous Casting [J]. ISIJ International, 1996, 36(Suppl):227-320.
- [9] Ramirez-Lopez P E, Lee P D. Explicit Modeling of Slag Infiltration and Shell Formation during Mould Oscillation in Continuous Casting [J]. ISIJ International, 2010, 50(3):425-434.
- [10] 王文学,王雨,迟景灏. 小方坯不锈钢用保护渣的研制[J]. 炼钢,2000,22(6):45-49.

张迎春(1979-),男,硕士研究生(北京科技大学),2003年西安建筑科技大学(本科)毕业,不锈钢生产工艺及质量控制。E-mail:18805732690@163.com

收稿日期:2014-06-28