

10Cr21Mn16NiN 不锈钢冶炼与连铸生产实践

张增武

(山西太钢不锈钢股份有限公司炼钢二厂,太原 030003)

摘要 通过对 10Cr21Mn16NiN 高氮不锈钢冶炼和连铸工艺研究,在生产中改进两步法治炼和连铸生产工艺,与三步法工艺相比,LF 精炼后期增氮速度由 $5 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}/\text{min}$ 提高到 $20 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}/\text{min}$,LF 精炼时间由 390 min 缩短至 240 min,连铸等钢时间由 4 h 降至 2 h 以下;解决了钢包增氮炉渣外溢的问题;避免了方坯在连铸过程中的翘头,No. 1、No. 2 流断浇率由开发时 100% 降至 0,设备事故率由 66.7% 降至 0,2 炉连浇率实现 100%。实践证明,方坯连铸机辊子非密排且仅有 1 台五辊拉矫机也能生产出高强不锈钢方坯。

关键词 高锰高氮不锈钢 10Cr21Mn16NiN 增氮 溢渣 翘头 方坯连铸

Smelting and Continuous Casting Practice of Stainless Steel 10Cr21Mn16NiN

Zhang Zengwu

(No. 2 Steelmaking Plant of Shanxi Taigang Stainless Steel Co. Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract Compare with the three-step method, through the study of smelting and continuous casting of High-Nitrogen stainless steel 10Cr21Mn16NiN, the two-step smelting and continuous casting technology has been optimized, the adding nitrogen rate is raised from $5 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}/\text{min}$ to $20 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}/\text{min}$ in later stages of LF, the LF refining time is shortened from 390 min to 240 min, the CCM steel waiting time is reduced from 4 h to 2 h; it solves the problem of slag spilling during the nitrogen adding; it also avoids the billet buckling during continuous casting, the breakage rate of No. 1 & No. 2 casting strand reduces from 100% to 0, the equipment accident rate decreases from 66.7% to 0, to achieve 100% 2-heats sequence casting. The practice shows that the billet casting without closely spaced rolls can produced High-Nitrogen stainless steel even though with only one five-high withdrawing and straightening machine.

Material Index High-Nitrogen & High-Manganese Stainless Steel 10Cr21Mn16NiN, Adding Nitrogen, Slag Spilling, Buckling, Continuous Casting Billet

10Cr21Mn16NiN 为高锰高氮奥氏体不锈钢^[1],是用 Mn 和 N 替代 Ni 而得到的一种资源节约型、高强、无磁奥氏体不锈钢,是电子元件、弹性材料、桥梁斜拉索和耐磨丝网等领域的理想材料。由于该不锈钢在冶炼和连铸生产中存在一定的难度,所以目前国内只有少数企业生产。

本文介绍钢厂如何通过改进工艺等一系列措施,解决了 10Cr21Mn16NiN 不锈钢在冶炼、增氮、溢渣和方坯连铸时出现一系列的问题,在批量生产方面取得了一定的效果。

1 生产工艺

10Cr21Mn16NiN 钢生产工艺流程:铁水三脱预处理→90 t K-OBM-S 转炉初炼→(90 t VOD 脱碳)→90 t LF 配锰增氮、钙处理→方板坯兼容连铸机 4 流 220 mm × 220 mm 方坯连铸。化学成分如表 1 所示。

1.1 冶炼出现的问题

该钢主要化学成分控制目标:[Mn]=16%、[Cr]=21.20%、[N]=0.63%。开发时,采用三步

表 1 10Cr21Mn16NiN 钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel 10Cr21Mn16NiN/%							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
0.05 ~ 0.30	0.30 ~ 15.00	~ ≤	≤	≤	21.00 ~ 1.00	~ 0.55 ~	
0.13	0.60	17.00	0.045	0.010	22.00	1.80	0.70

法生产,用氮气通过钢包底吹装置增氮,在 LF 增氮后期(钢中 [N] ≥ 0.55% 时)增氮速度仅为 (0.000 5% ~ 0.001%)/min,单炉在 LF 配锰、增氮、等分析合计时间长达 6.5 h。若组织 2 炉连浇,第 1 炉必须等第 2 炉 N 含量达到 0.61% 才能出站,每个浇次连铸等钢都在 4 h 以上,这期间其它不锈钢无法生产,K-OBM-S 转炉和连铸长时间处于停滞状态;另外,在 LF 增氮后期常因炉渣泡沫化溢出烧坏钢车电缆及钢包底吹供气管线,直接影响到生产的稳定与安全。

1.2 连铸出现的问题

原工艺开发初期,该钢在方板坯兼容连铸机 No. 1、2 流上生产时,出现方坯翘头脱钩,坯头顶断辊子和切割枪,No. 1、2 流方坯连铸断浇率 100%,设

备事故率 66.7%，现场废品率 23.5%，No. 1、2 流未拉完过整炉钢，浇铸后期由 No. 3、4 流将中间包内钢水拉完，连铸浇钢时间每次增加约一倍。

2 改进工艺

2.1 改进冶炼工艺

2.1.1 配锰与增氮

开发初期，前 10 炉均采用三步法生产，主要问题是：LF 增氮时间长，实现 2 炉连浇，连铸等待时间长；后用两步法生产，LF 进站成分 Mn 和 N 含量分别为 11.8% 和 0.47%。与三步法相比，LF 进站成分 Mn 和 N 含量分别为 2.1% 和 0.065%，都高。因此，在 LF 处理时，减少了配锰和增氮时间，缩短了 LF 处理时间，将连铸等钢时间控制在 2 h 以内。

但是，用两步法生产，还是有一定问题：在 K-OBM-S 转炉生产时，电解锰分 6 t 和 5 t 两次用料槽加入，每次加完用底吹流量 45 ~ 53 m³/min 强搅拌，搅拌时间分别为 10 min 和 6 min。为保证还原后出钢温度达到 1 520 ~ 1 530 °C，第 1 次加电解锰前，需将钢液温度升至 1 740 ~ 1 750 °C，这样热平衡下来，K-OBM-S 转炉冶炼温度还差 30 ~ 40 °C，还原前还需加硅铁吹氧再给钢液升一次温，这种工艺不但冶炼时间长还直接影响到炉衬寿命。

另外，在 K-OBM-S 转炉冶炼中，加完电解锰，5 个底供气元件全部通入氮气，流量为 45 ~ 53 m³/min，进行氮合金化，当钢液中 N 含量增到 0.52% 时，随着增氮时间的延长，钢液中 N 含量不升反而下降（见图 1）。钢液中 N 含量的变化，除热力学条件外，还受到动力学条件的影响，实际生产中，钢液脱氮和吸氮两个过程同时存在^[2]，陈列等人在高氮奥氏体不锈钢研制中得出的结论，在 K-OBM-S

转炉增氮上又得到进一步验证。

综合两步法和三步法生产中各自的优劣势，在原两步法基础上，改进了该钢配锰与增氮的冶炼工艺：

(1) 将加入转炉电解锰 6 t + 5 t 中的 5 t 移到 LF 加入；

(2) 由于钢液中氧活性元素显著地阻碍钢液的吸氮^[3]，在 LF 进行吹氮合金化前对钢液进行深脱氧，喂 $\Phi 13$ mm 铝线 2 ~ 3 m/t，进一步提高增氮速度；

(3) LF 中搅拌前，包括送电升温时段，钢包底吹全部吹氮进行氮合金化。

在生产中，确定该钢最佳增氮钢液温度为 1 560 ~ 1 580 °C；与钢包透气芯生产厂沟通，对钢包底吹装置承载压力 3 个不同点 1.5、1.7、1.9 MPa 进行增氮效果测试，钢包底供氮气最佳压力确定为 (1.7 ± 0.05) MPa。选取该钢钢液温度和钢包底吹压力最佳增氮参数，组合后，在 LF 增氮后期（钢中 [N] ≥ 0.55% 时），增氮速度由 5 × 10⁻⁶ ~ 10 × 10⁻⁶ / min 提高到 20 × 10⁻⁶ ~ 30 × 10⁻⁶ / min，比三步法增氮时间缩短 95 min，将 LF 处理时间降到 4 h 以下，连铸等钢时间小于 2 h。

在 LF 用铝强脱氧 + 钙处理是影响氮溶解度的又一个因素。开发初期，当钢液中 N 含量达到 0.63%，喂 $\Phi 13$ mm 硅钙线 3 ~ 4 m/t 又脱氮 0.02% ~ 0.03%，造成 LF 弱搅拌结束后重新升温、补氮和再弱搅拌，增加 LF 处理时间 13 ~ 16 min。李光强等人在增氮和脱氧研究结果表明，硅钙与铝复合强脱氧条件下，钢液的吸氮量有所下降^[4]，此结论在该钢上又一次得到验证。故此，钙处理前将钢液中 N 含量由 0.63% ~ 0.64% 提高到 0.65% ~ 0.66%，避免弱搅拌结束再次升温、补氮和弱搅拌。

2.1.2 改进渣系

采用两步法生产，在 LF 增氮至 0.55% 以上，钢液温度低于 1 540 °C，继续增氮，钢包内炉渣泡沫化变得严重，渣不停地从钢包内往外溢，三步法没有此现象发生。从 LF 进站炉渣主要成分（表 2）看，两步法与三步法相比：两步法炉渣中 SiO₂ 含量高，Al₂O₃ 和 F⁻ 含量以及碱度 (R) (CaO/SiO₂) 均低。

温度对炉渣的泡沫化有很大影响，温度低使炉渣粘度增大，促进炉渣的泡沫化^[5]。SiO₂ 属炉渣表面活性物质，对炉渣泡沫化有促进作用^[6]。谢兵等人对 LF 炉 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO-CaF₂ 系精炼渣发泡性能进行了研究，结果表明，当渣碱度较高时，

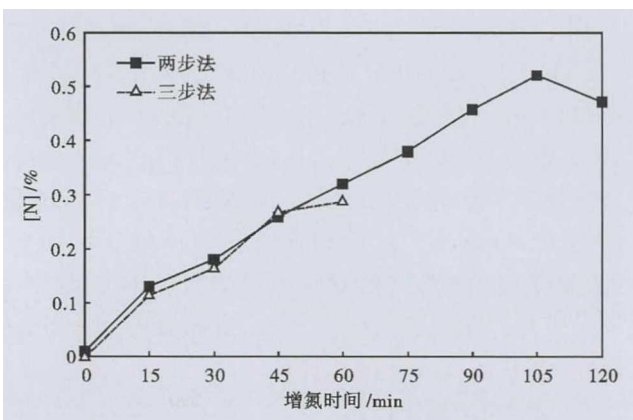


图 1 两步法与三步法在 K-OBM-S 转炉冶炼全过程增氮趋势

Fig. 1 Nitrogen increasing trend during melting of converter K-OBM-S with two-step and three-step method

表2 LF 进站炉渣主要成分及碱度

Table 2 Ingredient of slag before LF and basicity

生产方式	炉渣成分/%					碱度 (R)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	F ⁻	
两步法	43 ~ 50	25 ~ 32	1.0 ~ 3.0	10 ~ 13	1.0 ~ 2.0	1.3 ~ 2.0
	52 ~ 60	12 ~ 17	13 ~ 19	9 ~ 12	3.0 ~ 5.0	3.0 ~ 5.0
调渣后	50 ~ 55	10 ~ 14	10 ~ 15	9 ~ 12	3.5 ~ 6.0	3.5 ~ 5.5

注:样本数 n = 10。

Al₂O₃ 对渣发泡性能的影响没有明显的规律^[7]。碱度对炉渣的泡沫化有很大影响,随着碱度增大,渣泡沫化程度先是增大,当碱度(R) = 1.5 ~ 1.7 时达到最大值,其后下降^[5]。熔渣的碱度越高,其泡沫能力越小^[8]。对 LF 炉 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO-CaF₂ 系精炼渣发泡性能的实验研究表明:萤石含量对熔渣发泡指数影响显著,当渣中 CaF₂ 含量为 4% 时熔渣发泡指数达到最高,后随 CaF₂ 含量的增加发泡指数逐渐降低^[9]。

炉渣泡沫化不但依赖于钢包底吹压力和钢液温度,还依赖于炉渣成分含量。因此,在一定钢包底吹压力和钢液温度条件下,抑制炉渣泡沫化,解决炉渣外溢,更显示出炉渣组分的重要性。在采用两步法生产的同时,控制 LF 处理前渣厚度。钢液进 LF 前扒渣至 60 ~ 100 mm 厚,升温后调渣,加石灰 8 ~ 10 kg/t、萤石 4 ~ 5 kg/t、铝粉 1 ~ 1.5 kg/t,喂 Φ13 mm 铝线 2 ~ 3 m/t。LF 进站调渣后炉渣主要成分见表 2。

2.2 改进连铸工艺

方板坯兼容连铸机,为立弯式,弧半径 8 m,方坯二冷区由 4 个冷却水回路组成, No. 1、2 流各成一个系统, No. 3、4 流与板坯兼容。

从辊子配置看: No. 1、2 流只有 20.5 对,包括 2.5 对拉矫辊, 辊数少; No. 3、4 流 80 对,包括 10 对拉矫辊; No. 1、2 流比 No. 3、4 流,总辊数少 59.5 对,其中拉矫辊少 7.5 对, No. 1、2 流辊数少, 辊子配置属于非密排型。从拉矫机配置看: No. 1、2 流各配 1 台五辊拉矫机,一点矫直^[10], 而 No. 3、4 流多点矫直。该钢在方坯 No. 1、2 流连铸时出现的问题, No. 3、4 流没有。从连铸辊子和拉矫机配置看: No. 1、2 流不适合生产 10Cr21Mn16NiN 高强不锈钢。

针对 No. 1、2 流与 No. 3、4 流设备配置上存在的差异,从改进 No. 1、2 流连铸浇钢工艺入手:降低

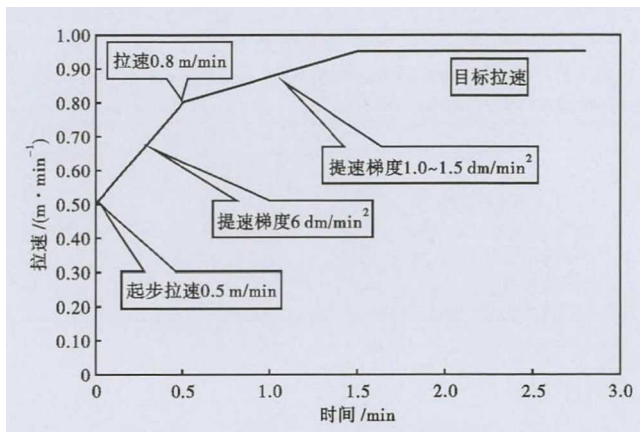


图2 方坯连铸开浇提高拉速曲线

Fig. 2 Curve of increasing casting speed from billet start casting

一冷水流量,将一冷水流量调到其最大流量的 75% ~ 80%;连铸起步拉速 0.5 m/min,以梯度 6 dm/min² 提速至 0.8 m/min,再以梯度 1.0 ~ 1.5 dm/min² 提速至目标拉速(见图 2);方坯进入二冷区时,关闭二冷区 3、4 回路冷却水;方坯头部进入拉矫机时,将拉矫辊压力转为冷坯压力,进行 1 ~ 2 次“抬辊-压辊”操作;方坯头部出拉矫机后,打开二冷区 3、4 回路冷却水,将二冷区比水量控制在 0.25 ~ 0.30 L/kg,控制方坯头部在浇钢过程中上翘,防止方坯头部提前与引锭链脱钩,避免了方坯顶断辊子或切割枪等各类事故的发生。

3 实践效果

3.1 冶炼效果

通过改进工艺,缩短了 LF 精炼时间和连铸等钢时间,为实现连铸 2 炉连浇,确保生产节奏的均衡稳定创造了条件。

3.2 连铸效果

针对 No. 1、2 流与 No. 3、4 流设备上存在的差异,通过改进 No. 1、2 流连铸浇钢工艺,解决了方坯头部上翘带来的一系列问题,确保了方坯 2 炉 4 流

表3 改进前后冶炼效果对比

Table 3 Effect comparison of smelting between before and after improvement

项目	改进前		改进后
	两步法	三步法	两步法
K-OBM-S 炉龄要求	炉役中期	全炉役	全炉役
K-OBM-S 冶时/min	119	67	96
K-OBM-S 锰加入量/t	6 + 5 (电解锰)	2.26 (高锰)	6 (电解锰)
VOD 处理时间/min	-	65	-
LF 处理时间/min	180	390	240
LF 处理前 [N]/%	0.47	0.065	0.45
LF 后期增氮速度 / (10 ⁻⁶ · min ⁻¹)	5 ~ 10	5 ~ 10	20 ~ 30
连铸等钢时间/h	3	4	< 2

表 4 改进前后连铸效果对比

Table 4 Comparison of continuous casting effect between before and after improvement

项目	指标对比	
	改进前	改进后
No. 1、2 流断浇率/%	100	0
连铸事故率/%	66.7	0
现场废品率/%	23.5	0
2 炉连浇率/%	0	100
2 炉连浇时间/min	190	109

正常连浇。

4 结论

(1)生产实践证明,方坯连铸机辊子非密排,仅

有 1 台五辊拉矫机,也能生产出高强不锈钢方坯。

(2)LF 采用钢包顶底复吹增氮工艺,可进一步缩短 LF 增氮时间,实现该系列高氮不锈钢 3 炉及以上多炉连浇。

(3)用光谱分析高氮不锈钢中 N 含量,同一时间取双样或同一钢样同一面不同点分析出的 N 含量波动在 ±0.015%,波动大;同样情况下用氧氮仪分析波动在 ±0.005%,波动小;1 个钢样光谱分析时间 4~6 min,氧氮仪分析时间 9~12 min,也是造成 LF 处理时间长的一个因素。因此,对于高氮不锈钢中 N 含量,要实现短时间内精准分析。

参考文献

[1] 张志方. 10Cr21Mn16NiN 高锰氮奥氏体不锈钢组织与性能研究[J]. 太原理工大学学报, 2012, 43(4): 449-452.

[2] 陈 列, 佐 辉, 任元和, 等. 1Mn15Cr17Ni2N 高氮奥氏体不锈钢的研制[J]. 特殊钢, 2007, 28(1): 47-48.

[3] 李 刚, 李京社, 杨树峰, 等. 含氮不锈钢氮气增氮的实验及工艺[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(增刊 1): 86-87.

[4] 李光强, 董训祥, 张 帆, 等. 316L 不锈钢的高压增氮与脱氧研究[J]. 武汉科技大学学报, 2010, 33(4): 349-350.

[5] 蒋仲乐主编. 炼钢工艺及设备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990: 27-28.

[6] 韩至成主编. 炼钢学(上册)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980: 34-35.

[7] 谢 兵, 赵和明. LF 精炼渣发泡性能研究[J]. 炼钢, 2003, 19(5): 54-55.

[8] 俞 皓. 精炼渣泡沫化的实验研究[J]. 上海金属, 2003, 25(6): 16-17.

[9] 张东力, 王晓鸣, 匡世波, 等. LF 精炼渣发泡性能的实验研究[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(6): 12-15.

[10] 贺道中, 周书才, 肖鸿光. 连续铸钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 44-45.

张增武(1963-),男,高级工程师,2003年北京科技大学(本科)毕业,不锈钢冶炼连铸工艺研究。
E-mail: zhangzwtg@126.com

收稿日期: 2019-12-28

