

钛稳定化 321 奥氏体不锈钢 EAF-AOD-LF-板坯连铸的生产工艺实践

谭建兴 武鹏 刘睿智 刘明生
(太钢不锈钢股份有限公司炼钢一厂,太原 030003)

摘要 钛稳定化 321 奥氏体不锈钢(/% :0.04 ~ 0.08C, 0.40 ~ 0.70Si, 0.80 ~ 1.50Mn, ≤0.035P, ≤0.005S, 17.0 ~ 18.0Cr, 9.0 ~ 9.5Ni, 0.20 ~ 0.40Ti, ≤0.0200N)的生产流程为 90 t EAF-45 t AOD-LF-180 mm × 1 238 mm 板坯连铸。该钢在浇铸过程中易产生水口结瘤和结晶器钢水中出现“结鱼”。根据 TiN 析出规律的分析,得出为降低 TiN 在钢水中的析出,应控制 [N] ≤ 0.015 0%, [Ti] ≤ 0.25%, 中间包钢水温度 ~ 1 500 °C。通过 AOD 全程采用超纯 Ar 搅拌,钢包中渣层厚度 150 mm, [O] 为 $15 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$, 控制 [N] ~ 110×10^{-6} , 采用碱度 0.75, 1 300 °C 粘度 0.165 Pa · s 的保护渣等工艺措施,使 Ti 回收率由原 40% 提高到 52%, 成品 N 含量由 0.014 0% 降至 0.010 5%, 浇铸结束后水口内径由 42 mm 增至 50 mm, 轧制缺陷率由改进前 3.5% 降至 1.2%。

关键词 钛稳定化 321 奥氏体不锈钢 AOD-LF-CC 流程 钛 氮 保护渣

Process Practice of Titanium Stabilizing Austenite Stainless Steel 321 Produced by EAF-AOD-LF-Slab Casting

Tan Jianxing, Wu Peng, Liu Ruizhi and Liu Mingsheng
(No1 Steelmaking Works, Taiyuan Iron & Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The production flowsheet of titanium stabilizing austenite stainless steel 321(/% : 0.04 ~ 0.08C, 0.40 ~ 0.70Si, 0.80 ~ 1.50Mn, ≤0.035P, ≤0.005S, 17.0 ~ 18.0Cr, 9.0 ~ 9.5Ni, 0.20 ~ 0.40Ti, ≤0.0200N) is 90t EAF-45 t AOD-LF-180 mm × 1 238 mm slab casting. The “floaters” in liquid of steel in mold occurs and the nozzle blocking produces in casting process. Based on analysis on TiN precipitation rule it is obtained that in order to decrease of TiN precipitation in liquid it should be controlled [N] ≤ 0.015 0%, [Ti] ≤ 0.25% and temperature of liquid in tundish ~ 1 500 °C. With process measures including using extra-pure Ar stirring in whole AOD process, controlling ladle slag thickness 150 mm, [O] $15 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$ and [N] ~ 110×10^{-6} , and using shielding slag with basicity 0.75 and viscosity 0.165 pa · s at 1 300 °C, the yield of Ti increases from original 40% to 52%, the N content in finished liquid decreases from 0.014 0% to 0.010 5%, the inner diameter of nozzle at finished casting increases from original 42 mm to 50 mm, and the defect of rolled products decreases from original 3.5% to 1.2%.

Material Index Titanium Stabilizing Austenite Stainless Steel 321, AOD-LF-CC Flowsheet, Titanium, Nitrogen, Shielding Slag

根据钢中 C、N 含量加入足量 Ti 作为稳定化元素,是 321 奥氏体不锈钢具备较强抗晶间腐蚀能力的主要原因,也是能够与低碳奥氏体不锈钢相抗衡的重要保证^[1]。但是,正由于 Ti 元素的加入,321 奥氏体不锈钢在冶炼、连铸过程中生产控制难度大,特别是高碳 321 奥氏体不锈钢的生产,由于 C、Ti 含量相对较高,连铸过程中易发生浸入式水口结瘤,而且结晶器中常常出现“结鱼”(又称结壳或结块),即在结晶器内形成的、漂浮在钢液与保护渣接触区域的凝固钢块。“结鱼”产生会在连铸坯及不锈钢中、薄板表面形成大量表面缺陷^[2]。

1 化学成分与生产工艺流程

321 奥氏体不锈钢
冶炼环节主要是 Ti、N 的控制,在满足成分要

求的基础上,Ti、N 应尽量控制在较低水平,这有助于降低浇注过程“结瘤”、“结鱼”风险,典型高碳 321 奥氏体不锈钢的化学成分如表 1 所示。生产工艺流程为:90 t EAF→45 t AOD→45 t LF→模铸。

本文涉及的钢水钛合金化在 AOD 炉内完成。

2 含钛不锈钢结晶器结鱼形成原因和控制措施

和铁素体含钛钢种相比,奥氏体含钛钢种如 321 奥氏体不锈钢水口结瘤情况较轻,但是易于“结鱼”和形成表面缺陷,原因很简单,较低的液相线温度和较高的 N、O 溶度积更容易导致溶解物在结晶器中较低的温度下析出,而不是在中间包或者水口^[3]。连

表 1 321 奥氏体不锈钢的化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of austenite stainless steel 321 / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	N
0.04 ~ 0.08	0.40 ~ 0.70	0.80 ~ 1.50	≤0.035	≤0.005	17.0 ~ 18.0	9.0 ~ 9.5	0.20 ~ 0.40	≤0.020 0

铸过程中随着钢水温度下降,在结晶器弯月面处大量析出 TiN,并聚集在钢水与保护渣界面处,与保护渣中的 Fe₂O₃ 反应,放出氮气,促使局部钢水温度下降,冷凝后形成^[4]。当钢水从中间包流至结晶器过程中如果有空气进入钢水,或者钢中 Ti 含量越高会使这种“结鱼”现象越严重,甚至断浇,其中对头坯的质量影响更为显著,最终影响轧制质量。

在生产中控制结鱼的主要措施是:提高中间包温度在 5 ~ 10 ℃ (尤其是针对高 [N]、[Ti] 炉次和连浇第 1 炉钢),稳定浇铸的同时保证覆盖较厚的保护渣,严格控制连铸出苗时间在 (70 ± 5) s,连铸起步阶段采用放热型保护渣。

含钛不锈钢连铸结晶器结鱼的形成机理如图 1 所示^[2],结晶器结鱼横断面形貌见图 2。

3 TiN 的析出规律分析

从 TiN 析出或者稳定与钢水中 N 和 Ti 的关系^[5]得出,温度越低,Ti、N 浓度越高,越容易析出。而且从“结鱼”物质形貌上看,TiN 形核往往也以其氧化物等夹杂物为核心。

通过研究数据的整理,运用六西格玛工具回归得到了 TiN 析出温度的计算公式:

$$\text{TiN 析出温度} = 1\ 343 + 6\ 770 \times [\text{N}] + 251 \times [\text{Ti}] \quad (1)$$

式中:[N]、[Ti]-钢水中 N、Ti 百分含量。

经过分析式(1),为了降低 TiN 析出几率,应该精细控制浇注前 [N] ≤ 0.015 0%, [Ti] ≤ 0.25%。中间包钢水温度控制在 (1 500 ± 5) ℃,对于高碳 321 奥氏体不锈钢,由于 [Ti] 较高,应该严格控制钢水中的 N 含量在一个极低的水平,且中间包钢水温度控制在 (1 505 ± 5) ℃。

4 AOD 精炼及 Ti 合金化控制

对于该不锈钢,AOD 全程采用 Ar 气进行搅拌,为改善脱 N 效果,要求兑入 AOD 的电弧炉预熔液(钢水)C 控制在 2% ~ 3%,针对含量较高的 321 奥氏体不锈钢,为了进一步降低钢水的氮含量,减少吹氩过程增氮,在冶炼过程要求氩气中的氮含量

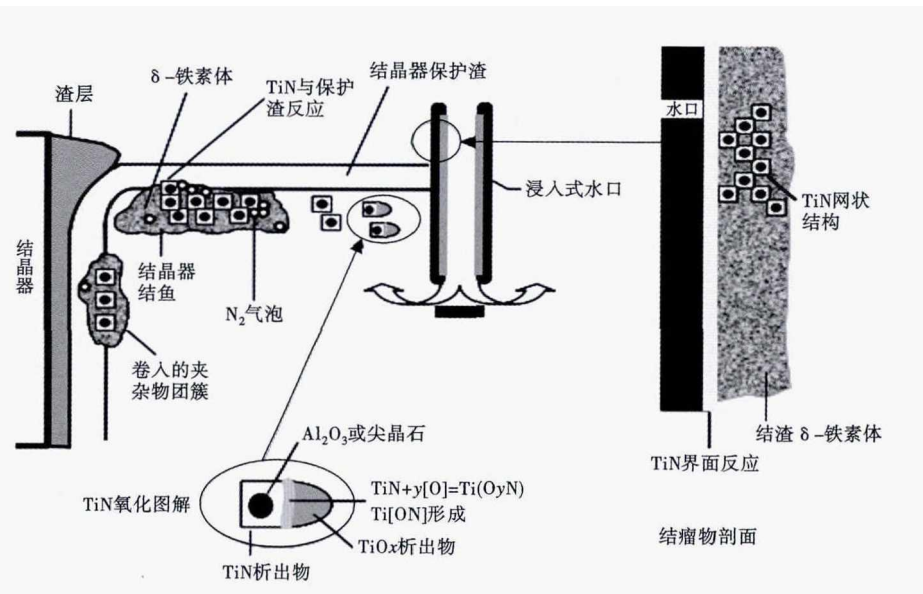


图 1 钛稳定化不锈钢结晶器结鱼的形成机理

Fig. 1 Formation mechanism of floater in liquid of titanium stabilizing stainless in mold

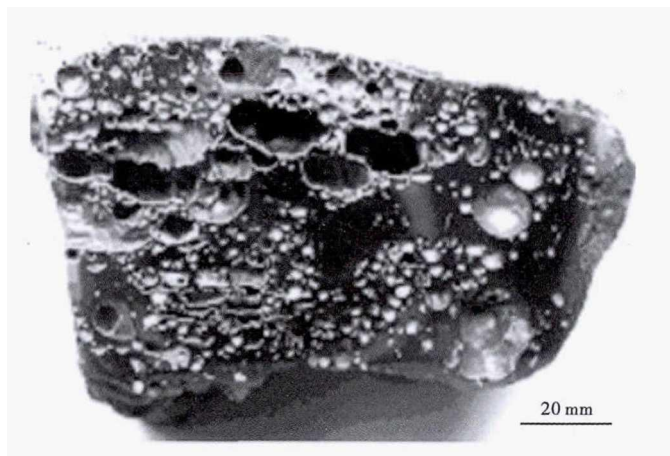


图 2 结晶器钢水中结鱼横断面的形貌

Fig. 2 Morphology of cross section of floater in liquid in mold

≤ 0.000 6%。

AOD 还原采用硅铁,还原温度控制在 1 700 ~ 1 730 ℃,还原后进行炉内扒渣,扒渣量大于 90%。还原扒渣后,加入 500 kg 石灰,400 kg 萤石调渣,保证脱氧效果和包中渣层厚度在 (150 ± 50) mm,合理的渣层厚度可以减少 LF 送电过程中 [Ti] 的烧损以及吹氩过程钢水裸露带来的增氮,调完渣后再向钢水中加入铝粉 0.5 kg/t 和硅钙粉 0.5 kg/t 进行深脱氧,钢水 [O] 可降低到 15 × 10⁻⁶ ~ 20 × 10⁻⁶,出钢前加入 FeTi, Ti 的回收率能够稳定在 (52 ± 2) %。

出钢前提前对出钢包进行氩气排空,减少出钢过程钢水增氮,冶炼过程钢水氮含量控制如图 3 所示,目前,钢厂 321 奥氏体不锈钢成品氮含量控制平

均水平在 $(110 \pm 10) \times 10^{-6}$ 。

5 连铸结晶器保护渣优化

在连铸过程中,由于含钛不锈钢钢水粘稠,且含有 [Ti] 和 [Al] 等易氧化元素,与保护渣接触时,容易生成 TiN、Ti(CN)、Al₂O₃、TiO₂ 等高熔点化合物,在钢水面上与保护渣混合在一起,形成冷皮^[5]。

生产实践中发现,碳含量较高的 321 奥氏体不锈钢在连铸高连浇后期存在结晶器保护渣结块的现象,为改善连铸坯表面质量以及提高后期保护渣吸附性能,经过 50 炉的结晶器保护渣改进试验后,对碳含量较高的 321 奥氏体不锈钢连铸结晶器保护渣进行了改进(表 2),采用了碱度和粘度更低的保护渣,有利于降低含钛不锈钢保护渣的结晶温度,同时较低的 Al₂O₃ 含量又能够降低铝镁尖晶石的形成,从而降低 TiN 以铝镁尖晶石为核心析出的几率。

碳含量较高的 321 奥氏体不锈钢采用改进型结晶器保护渣后,连铸高连浇后保护渣结块现象明显改善,铸坯表面质量得到提升。改进前后主要工艺质量参数对比见表 3。

6 结论

(1) 碳含量较高的 321 奥氏体不锈钢在生产过程控制难度较普通 321 奥氏体不锈钢难度更大,“结鱼”、“结瘤”风险更高,必须严格控制 [Ti]、[N]、钢水洁净度以及连铸中间包温度。

(2) 321 系列钢种生产过程需要控制项目为:① 兑入 AOD 的电弧炉预熔钢水温度 1 470 ~ 1 530 ℃、2% ~ 3.0% C、16.5% ~ 17.5% Cr、8% ~ 9.2% Ni; ② AOD 还原控制 S ≤ 0.005%, 碱度 1.8 ~ 2.2, 因为渣中 SiO₂ 的活度比钢水 [O] 在决定 Ti 的回收率以及夹杂物的形成方面起着更重要的作用; ③ AOD 出钢前对钢包进行吹氩排空,减少出钢过程钢水吸氮; ④ LF 吹氩强搅拌时间 ≥ 8 min, 弱搅拌时间 ≥ 10 min; ⑤ 中间包温度:对于高 C 系列 321 奥氏体不锈钢(以及高 [Ti]、[N] 和连浇第 1 炉钢),中间包温度应比普通 321 奥氏体不锈钢高 5 ~ 10 ℃; ⑥ 中间包烘烤 ≥ 150 min, 开浇前对结晶器进行氩气排空,做好无氧化保护; ⑦ 对碳含量较高的 321 奥氏体不锈钢,在生产实践中应该选用与之匹配的连铸结晶器保护渣。

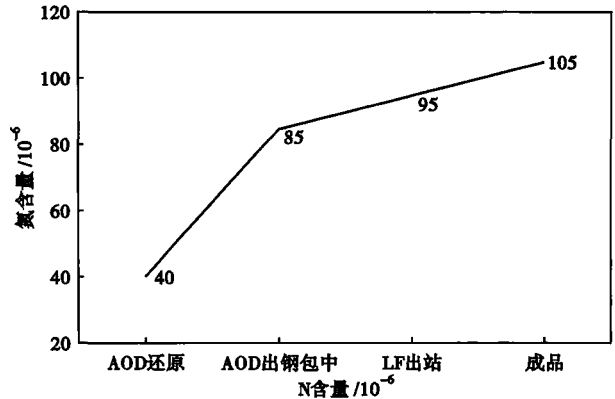


图 3 321 不锈钢冶炼过程氮含量变化

Fig. 3 Variation of nitrogen content in stainless steel 321 in steelmaking process

表 2 改进前后两种保护渣性能对比

Table 2 Comparison between two shielding slag performance before and after optimization

工艺	保护渣成分/%								碱度	熔点/℃	粘度(1 300 ℃)/ (Pa · s)
	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	F	C			
改进前	34.5	31.70	1.30	6.70	2.00	10.10	7.00	4.40	0.92	1 125	0.25
改进后	30.25	22.55	3.03	6.52	0.23	12.10	9.77	3.84	0.75	1 030	0.165

表 3 工艺改进前后主要工艺质量参数对比

Table 3 Comparison between technology indexes before and after process improvement

参数名称	改进前	改进后
Ti 回收率/%	40	52
成品 N 含量/%	0.014 0	0.010 5
连铸开浇出苗时间/s	85	70
浇铸结束后浸入式水口内径(中部)/mm	42	50
轧制缺陷率/%	3.5	1.2

(3) 通过一系列工艺研究与实践,太钢炼钢厂生产的 321 系列钢种中板、冷板质量长期稳定受控。

参考文献

[1] 余志友. 321 不锈钢冶炼与连铸工艺研究与实践[J]. 连铸, 2014, 2(3): 1-2.

[2] Nunnington R C and Sutcliffe N. The Steelmaking and Casting of Ti Stabilized Stainless Steels. 59th Electric Furnace Conference and 19th Process Technology Conference Proceeding (USA), Iron and Steel Society/AIME. 2002; 361-394.

[3] 孙铭山, 邹德宁. 钛稳定不锈钢的冶炼与连铸(摘译)[J]. 太钢译文, 2005(3): 21-27.

[4] 郑宏光, 陈伟庆, 陈宏, 等. 钛稳定化 321 不锈钢连铸结晶器“结鱼”的研究[J]. 特殊钢, 2004, 25(4): 50-51.

[5] 孙丽枫, 刘承军, 张红令, 等. 含钛不锈钢连铸保护渣的研究[J]. 保护渣, 2006(5): 43.

谭建兴(1985-), 男, 工程师, 2008 年东北大学(本科)毕业, 不锈钢精炼技术管理及产品开发。

E-mail: tanjx@tisco.com.cn