

100 t EAF-LF-VD-CCM 流程 S355NL 风电法兰用钢 Φ500 ~ 800 mm 连铸坯的研制

于学文 于辉 谷昊

(莱芜钢铁集团有限公司特钢事业部, 莱芜 271105)

摘要 通过电弧炉兑 60% 铁水, 大量换渣操作, 使用低钛合金控制电弧炉终点 $[Ti] \leq 7 \times 10^{-6}$, LF 精炼采用低钛脱氧合金化材料, 控制 LF 终点 $[Ti] \leq 30 \times 10^{-6}$, VD 27 min 处理, 控制中间包钢水过热度 20 ~ 30 °C 全程保护浇铸等工艺措施, 成功试生产出 S355NL 风电法兰用钢 Φ500 ~ 800 mm 连铸坯 (成分: 0.14 ~ 0.15C, 0.21 ~ 0.23Si, 1.30 ~ 1.33Mn, 0.03 ~ 0.04Nb, $\leq 0.003Ti$, 0.04 ~ 0.05V, $\leq 0.010P$, $\leq 0.003S$, 0.02 ~ 0.04Al)。检验结果表明, 该钢锻件的综合机械性能良好, -50 °C 冲击功为 87.4 ~ 100.3 J, 用户产品无损探伤合格率达 99.5%。

关键词 风电法兰用钢 S355NL Φ500 ~ 800 mm 连铸坯 -50 °C 冲击功 冶金质量

Development and Production of Φ500 ~ 800 mm Concasting Bloom of S355NL Steel for Wind Power Flange by 100 t EAF-LF-VD-CCM Flow Sheet

Yu Xuwen, Yu Hui and Gu Hao

(Special Steel Division, Laiwu Iron and Steel Group Co Ltd, Laiwu 271105)

Abstract With the process measures including arc furnace charging 60% hot metal, changing large amount of slag operation, using low titanium alloy to control arc furnace end $[Ti] \leq 7 \times 10^{-6}$, using low titanium deoxidizer and alloying materials in LF refining process to control LF end $[Ti] \leq 30 \times 10^{-6}$, VD treatment for 27 min, controlling tundish liquid superheating extent 20 ~ 30 °C and whole course shielding casting, the Φ500 ~ 800 mm concasting bloom of S355NL steel for wind power flange (成分: 0.14 ~ 0.15C, 0.21 ~ 0.23Si, 1.30 ~ 1.33Mn, 0.03 ~ 0.04Nb, $\leq 0.003Ti$, 0.04 ~ 0.05V, $\leq 0.010P$, $\leq 0.003S$, 0.02 ~ 0.04Al) has been successfully pilot-produced. The examination results show that the comprehensive mechanical properties of steel are better, the impact energy at -50 °C is 87.4 ~ 100.3 J, and user products nondestructive testing qualified rate is up to 99.5%.

Material Index Steel S355NL for Wind Power Flange, Φ500 ~ 800 mm Concasting Bloom, Impact Energy at -50 °C, Metallurgical Quality

风电法兰用钢作为一种大直径环状连接件, 主要用于风电设备塔筒与底座的连接, 由于其所处特殊的地域环境以及要求法兰在野外稳定运行 20 年以上, 须经受各种极恶劣天气和复杂的风力交变载荷, 长期在 50 ~ 80 m 高处承受拉伸、弯曲和剪切等作用力, 要求有较好的综合力学性能、耐低温性能, 良好的焊接工艺性能和较好的耐腐蚀性能。

1 工艺流程及技术要求

工艺流程: 配料-100 t UHP EAF-120 t LF-120 t VD-CCM-缓冷。

选用欧标 S355NL 钢的化学成分见表 1, 为达到其特殊性能要求, 在国标 Q345E 钢的基础上, 适当增加了碳、锰含量, 并且此钢要求在 -50 °C 冲击, 为此, 严格控制钢中 Ti 含量 ($\leq 90 \times 10^{-6}$), 同时加入了适

量的钒、铌合金, 即保证了冲击功、强度和韧性; 通过控制适当的 Al、N 含量 ($\leq 100 \times 10^{-6}$), 再次提高了强度; 严格控制钢中有害元素的含量: P ($\leq 130 \times 10^{-6}$)、S ($\leq 50 \times 10^{-6}$)、O ($\leq 20 \times 10^{-6}$)、H ($\leq 1.5 \times 10^{-6}$) 等, 保证钢水的纯净度基本达到洁净钢的要求。

低倍和高倍组织要求见表 2 和表 3。

2 工艺设备及参数

LF 双工位、VD 分别采用国产设计制作, 其中

表 1 S355NL 钢化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of steel S355NL /%

项目	C	Si	Mn	Cr	Nb	Ti	V	P	S	Alt
技术标准	0.14 ~ 0.18	0.15 ~ 0.40	1.30 ~ 1.60	≤ 0.3	0.03 ~ 0.05	≤ 0.009	0.04 ~ 0.12	≤ 0.013	≤ 0.005	≥ 0.02
内控	0.14 ~ 0.16	0.20 ~ 0.30	1.30 ~ 1.38	≤ 0.1	0.03 ~ 0.05	≤ 0.003	0.04 ~ 0.06	≤ 0.010	≤ 0.003	0.02 ~ 0.04
熔炼成品	0.14 ~ 0.15	0.21 ~ 0.23	1.32 ~ 1.33	≤ 0.10	0.03 ~ 0.04	≤ 0.0027	0.04 ~ 0.05	≤ 0.010	≤ 0.003	0.02 ~ 0.04

表2 S355NL 钢的低倍组织/级

Table 2 Macro-structure of steel S355NL /rating

项目	中心疏松	缩孔	中心裂纹	中间裂纹	皮下气泡	皮下裂纹
标准	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0
144 炉	1.5	0	0.5	0	0	0
145 炉	1.0	0	0.5	0	0	0

表3 S355NL 钢的高倍非金属夹杂物/级

Table 3 Requirement of micro-structure on steel S355NL /rating

A		B		C		D		Ds
粗	细	粗	细	粗	细	粗	细	
≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 2.0

表4 电弧炉主要技术参数

Table 4 Main technical parameters of arc furnace

项目	参数
炉型	EO-EBT
变压器容量/MVA	90
冶炼周期/min	50 ± 2
出钢量/t	120
炉料组成	铁水 + 废钢
电极直径/mm	610
电极分布圆直径/mm	1 200
电极消耗/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	1.6
电耗/($\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$)	360
RCB 氧枪/支	4

表5 LF 主要技术参数

Table 5 Main technical parameters of LF

项目	参数
变压器容量/MVA	25
额定处理量/t	120
钢包直径/mm	3 710
钢包自由空间/mm	1 000
升温速度/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)	≥ 4.5
电极直径/mm	450

表6 连铸机主要技术参数

Table 6 Main technical parameters of CCM

项目	参数
机型	全弧形
机数 \times 流数/机 \times 流	5×5
弧形半径/m	16.5
流间距/mm	2 250
铸坯断面/mm	$\Phi 500, \Phi 650, \Phi 800$
中间罐容量/t	41
铸坯定尺长度/m	4~9

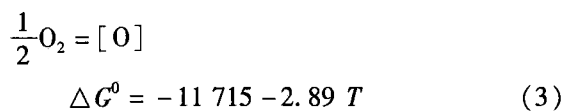
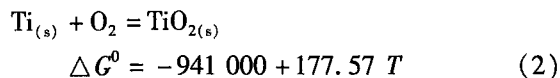
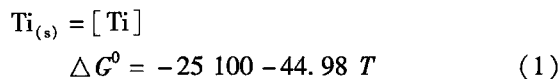
VD 处理钢水能力为 120 t, 处理时最高真空度为 30 Pa。其余设备主要参数分别列于表 4、表 5 和表 6。

3 试制过程

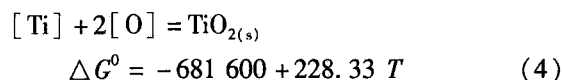
3.1 电弧炉冶炼

电弧炉通过采用优化废钢搭配, 稳定的铁水兑

入量(铁水比 60%), 合理供电及 RCB 吹氧喷碳制度, 确保了脱碳量及初炼钢水较低气体含量; 同时鉴于在氧化性条件下, 钢中的钛存在如下反应^[14]:



由公式(1)、(2)、(3)可得:



1 873 K 反应(4)达到平衡时:

$$\Delta G^0 = -RT \ln K = -RT \ln \frac{a_{\text{TiO}_2}}{f_m [\text{Ti}] f_{\text{O}}^2 [\text{O}]^2} \quad (5)$$

$\text{TiO}_{2(s)}$ 取纯物质为标准态时, $a_{\text{TiO}_2} = 1$, 钢液以 1% 的标准态, 根据站东平等人的研究^[5] 得出, 脱钛应在钢中氧含量较高的条件下进行, 如转炉、电弧炉氧化期, 将钢中的钛氧化成氧化钛, 使钛的氧化产物进入炉渣中, 再通过换渣、流渣或扒渣的方式将其去除, 电弧炉通过采取增大炉内石灰消耗(55.6 kg/t) 及换渣操作, 确保电弧炉较低的终点磷(平均 0.006 5%), 通过优化出钢合金搭配, 使用低磷、低钛合金, 杜绝电弧炉出钢下渣, 能够有效地将电弧炉出钢 $[\text{Ti}]$ 控制在 7×10^{-6} 以下, 最低可达到 5×10^{-6} 。

3.2 LF 精炼

LF 精炼采用大渣量(16 kg/t)、强还原气氛、高碱度的强脱硫操作, 保证足够的精炼周期(55 ± 5) min, 确保硫含量满足质量计划要求, 成品 $S \leq 0.004\%$, 溶解氧含量 $\leq 6 \times 10^{-6}$; 同时 LF 采用低钛脱氧合金化材料, 能够有效地将钢水成品 $[\text{Ti}]$ 控制在 30×10^{-6} 以下, 最低可达到 14×10^{-6} 。

同时 LF 还通过使用喂线导管可升降式喂线机喂线, 在出钢前对钢水进行钙处理以及合理的氩气搅拌, 钢水中的铝脱氧夹杂物得到充分的变性、聚集、上浮排除。LF 精炼渣成分如表 7 所示。

3.3 VD 精炼

VD 精炼采用机械真空泵, 通过采用氩气流量、搅拌时间等参数均设定好的 27 min 真空处理模型以及炉内视频监控系系统, 确保了 VD 真空处理过程

表 7 LF 精炼顶渣成分和碱度
Table 7 Ingredient and basicity of LF refining slag

炉号	成分/%								碱度 (R)
	ΣFe	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	MnO	S	P ₂ O ₅	
125	0.50	3.51	9.70	48.32	33.83	0.32	0.348	0.006	13.77
126	0.62	4.97	8.77	51.61	29.82	0.27	0.365	0.016	10.38
127	0.58	3.38	10.57	48.23	38.71	0.27	0.357	0.006	14.27

表 8 S355NL 钢锻件成品的机械性能
Table 8 Mechanical properties of forges of steel S355NL

工件 编号	炉号	抗拉强 度/MPa	屈服强 度/MPa	断面收 缩率/%	伸长率/ %	冲击功/J	试验温 度/℃	晶粒 度
13-G445-2	145	531 ~ 556	365 ~ 386	74 ~ 76	32	87.4, 99.3, 96	-50	8.6
13-G445-35	147	549 ~ 582	374 ~ 391	72 ~ 74	32	88.8, 100.3, 91.7	-50	8

的安全、稳定、高效,提高 VD 真空过程的脱氢率 ($[H] \leq 1.5 \times 10^{-6}$)、脱氮率;同时基于钙处理后钢中存在较大尺寸的夹杂物,生产中一般采用软吹操作对钢水进行弱搅拌净化处理,吹入的氩气泡可为钢中显微夹杂物提供黏附的基体,使之黏附在气泡表面随气泡一起上浮排入渣中的理论^[6]以及李强等人在软吹对夹杂物去除方面的实际研究^[1],结合实际生产组织情况,采取了 VD 破空后大于 20 min 的软吹时间,保证了钢水的洁净度和可浇注性。

3.4 连铸

连铸坯 $\Phi 500, \Phi 650, \Phi 800$ mm 三个断面的拉速分别采用 0.35, 0.25, 0.15 m/min 的最佳拉速,二冷配水采用动态配水,全程保护浇注,采用 M-EMS、F-EMS,采用钢包水口加石棉垫并吹氩气保护和中间罐吹氩气保护,中间包烘烤温度 ≥ 1200 °C,中间包钢水过热度按 20 ~ 30 °C 控制,中间包采用专用覆盖剂和碳化稻壳搭配使用进行中间包保温,铸坯矫直温度控制在 950 ~ 1050 °C,铸坯入坑缓冷严格执行不同断面的缓冷时间规定。

4 试制结果

钢水成品成分见表 1。

4.1 铸坯表观质量

S355NL 钢连铸坯表面及表观质量良好,端面切割整齐,定尺长度合格。

4.2 锻件机械性能

锻件制造流程为“连铸坯下料→加热炉加热→制坯→二次加热→碾环→码垛缓冷→粗加工→热处

理→精加工→探伤→成品”,不同断面连铸坯加热制度不同,加热温度在 1100 ~ 1350 °C,粗加工后进行热处理,热处理制度为正火(905 ± 10) °C,根据环形锻件壁厚调整加热时间,锻件加工成成品后的机械性能见表 8。

通过用户反馈的所加工工件的综合机械性能检测情况看,用 S355NL 连铸圆坯锻造生产的工件抗拉强度、屈服强度、晶粒度以及 -50 °C 的低温冲击功均能满足用户需求。

5 结论

(1) 通过增大电弧炉渣量和铁水比,强化脱磷脱钛及较低的初炼钢水的气体含量控制,采用低钛脱氧材料,确保了钢中较低的磷含量、钛含量,并采用保护浇注等措施,使钢的综合机械性能良好,特别是使 -50 °C 冲击功超过 80 J,完全满足用户要求。

(2) 采用强化脱氧操作,纯钙线对钢水进行夹杂物变性处理,确保 VD 真空后大于 20 min 的软吹以及采用低过热度浇注,“三恒”稳态浇注,全程保护浇注以及 M-EMS、F-EMS 等措施使用户生产的成品探伤合格率达到 99.5%。

参考文献

- [1] 高伟,廖新德,成国光,等. 轴承钢中 TiN 夹杂物控制工艺及理论研究[J]. 安徽工业大学学报, 2005, 22(4): 686-689.
- [2] 梁连科,车荫昌. 冶金热力学与动力学[M]. 沈阳:东北工学院出版社, 1990.
- [3] 傅杰,王平. 轴承钢中微量元素氧-氮-钛-钙的作用与控制[J]. 特殊钢, 1998, 19(6): 31-34.
- [4] 傅杰,朱剑. 微合金钢中 TiN 的析出规律研究[J]. 金属学报, 2000, 36(8): 801-804.
- [5] 站东平,姜周华,龚伟,等. 轴承钢中氮化钛的生成与控制[J]. 过程工程学报, 2009, 9(1): 239-240.
- [6] 赵沛. 炉外精炼及铁水预处理实用技术手册[M]. 北京:高等教育出版社, 2004.
- [7] 李强,王建,王新华,等. X80 管线钢钙处理后软吹时间对夹杂物行为的影响[J]. 钢铁钒钛, 2011, 32(2): 75-77.

于学文(1982-),男,工程师,2007 年内蒙古科技大学(本科)毕业,电弧炉炼钢工艺技术与优特钢新产品研发。
E-mail: balihan2000@163.com

收稿日期: 2014-09-09