

## 70 t LD-LF-VD-CC 流程生产耐候钢 S355J2 的工艺实践

李雪兆<sup>1</sup> 李双江<sup>2</sup> 董丽霞<sup>1</sup> 白肖峰<sup>3</sup>

(1 中钢石家庄工程设计研究院有限公司, 石家庄 050000; 2 河北钢铁技术研究总院, 石家庄 050000;  
3 承德建龙实业有限公司, 承德 067201)

**摘要** 耐候钢 S355J2 (/% : 0.07 ~ 0.12C, 0.25 ~ 0.40Si, 1.0 ~ 1.3Mn, ≤0.015P, ≤0.008S, 0.25 ~ 0.40Cu, 0.35 ~ 0.50Cr, 0.10 ~ 0.25Ni, 0.025 ~ 0.040Nb, 0.025 ~ 0.050Als) 的冶炼流程为 70 t LD-LF-VD-280 mm × 320 mm 坯 CC 工艺。通过控制 LD 终点 [C] ≤ 0.07%, 终点 [P] ≤ 0.014%, 转炉下渣量 ≤ 2 kg/t 和 LF 精炼渣碱度  $R \geq 3.0$ , ( $Al_2O_3$ ) = 20% 等工艺措施, 铸坯的 T[O] 为  $22 \times 10^{-6}$ , 夹杂物平均直径为 4.6 μm, 5 μm 以下夹杂物比例在 97.5% 以上。连铸过程采用  $R = 1.02, 6.9\% (B_2O_3 + Li_2O), 5.4\% MgO$  和 7.6%  $Al_2O_3$  的含氟保护渣, 连铸坯表面震痕较浅, 表面无清理率达到 95.17%。连铸坯缩孔、疏松 ≤ 1.0 级, 角部、边部和中心裂纹为 0 级, 满足连铸坯质量的控制要求。

**关键词** 70 t LD-LF-VD-CC S355J2 耐候钢 冶金质量 夹杂物

## Practice of Process for Production of Weathering Steel S355J2 by 70 t LD-LF-VD-CC Flowsheet

Li Xuezhao<sup>1</sup>, Li Shuangjiang<sup>2</sup>, Dong Lixia<sup>1</sup> and Bai Xiaofeng<sup>3</sup>

(1 Sinosteel Shijiazhuang Engineering Design & Research Institute Co Ltd, Shijiazhuang 050000;  
2 Hebei Centre Iron & Steel Technology Research Institute, Shijiazhuang 050000;  
3 Chengde Jianlong Industry Co Ltd, Chengde 067201)

**Abstract** The metallurgical flowsheet of weathering steel S355J2 (/% : 0.07 ~ 0.12C, 0.25 ~ 0.40Si, 1.0 ~ 1.3Mn, ≤0.015P, ≤0.008S, 0.25 ~ 0.40Cu, 0.35 ~ 0.50Cr, 0.10 ~ 0.25Ni, 0.025 ~ 0.040Nb, 0.025 ~ 0.050Als) is 70 t LD-LF-VD-280 mm × 320 mm bloom CC process. With the process measures including controlling LD end [C] ≤ 0.07%, end [P] ≤ 0.014%, converter tapping slag amount ≤ 2 kg/t, and refining slag basicity  $R \geq 3.0$  and ( $Al_2O_3$ ) = 20%, the T[O] in casting bloom is  $22 \times 10^{-6}$ , average diameter of inclusions is 4.6 μm with ratio of less than 5 μm inclusions more than 97.5%. By using the bearing fluorine mold powder with basicity  $R = 1.02, 6.9\% (B_2O_3 + Li_2O), 5.4\% MgO$  and 7.6%  $Al_2O_3$ , the bloom oscillation mark is slight, and the ratio of bloom surface without cleaning is up to 95.17%. The rating of shrinkage and porosity of bloom ≤ 1.0, and the rating of crack at corner, edge and center of bloom is 0 to meet the control requirement of bloom quality.

**Material Index** 70 t LD-LF-VD-CC, Weathering Steel S355J2, Metallurgical Quality, Inclusions

耐候钢广泛应用于铁路基建、海洋平台、桥梁和集装箱等领域<sup>[1]</sup>。欧标 (EN10025-5; 2004) 的 S355J2 耐候钢对钢材力学、组织、焊接和成型性能的要求较高, 现场生产组织及工艺控制技术要求也较严格<sup>[2]</sup>。S355J2 耐候钢中的 Cu 可以提高其耐蚀性能, 但容易引起铸坯和轧材表面热裂纹缺陷。在钢中加入一定量的 Ni 不但可以提高 Cu 固溶体的熔点, 还可以改善钢表面的热裂纹现象<sup>[3]</sup>。

### 1 工艺路线

炼钢厂采用 70 t LD-LF-VD-TD(中间包)-CC 工艺流程生产 S355J2 耐候钢 280 mm × 320 mm 连铸坯。S355J2 耐候钢化学成分 (/% ) 为 0.07 ~ 0.12C, 0.25 ~ 0.40Si, 1.0 ~ 1.3Mn, ≤0.015P, ≤0.008S, 0.25 ~ 0.40Cu, 0.35 ~ 0.50Cr, 0.10 ~ 0.25Ni, 0.025 ~ 0.040Nb, 0.025 ~ 0.050Als。主要

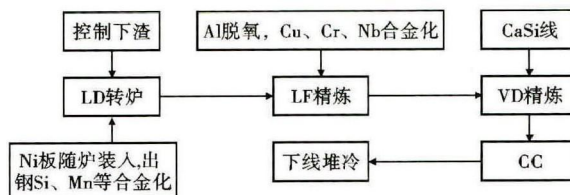


图 1 S355J2 耐候钢生产工艺流程  
Fig. 1 Flowsheet of production of weathering steel S355J2

的工艺路线见图 1。

### 2 生产工艺过程控制

#### 2.1 LD 冶炼

合金化镍板在转炉中装入, 转炉终点 [C] ≤ 0.07%, [P] ≤ 0.014%, 出钢温度 1 610 ~ 1 640 °C; 出钢采用钢芯 Al 脱氧, 吨钢加入量 2.7 kg。转炉出钢过程下渣量在 2 kg/t-Fe 以下。出钢过程吨钢精

炼渣加入量为 4.51 kg。

## 2.2 LF 精炼

LF 精炼采用 Al 脱氧后加入 Cu、Cr 和 Nb 等合金。LF 终点钢水酸溶铝的质量分数为 0.025% ~ 0.04%；LF 终点炉

渣的化学成分 (%) 为:47.5CaO,14.5SiO<sub>2</sub>,21Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,9MgO,1.2(FeO + MnO)。LF 精炼软吹时间在 8 min 以上。为了保证较高的钢水脱硫率,LF 精炼钢水的温度控制在 1680 °C 以上。

## 2.3 VD 精炼

VD 精炼喂入 CaSi 线,控制精炼钢水的 Ca/Al 在 0.06 ~ 0.10 范围;真空处理时间在 10 min 以上,软吹时间 35 ~ 40 min,VD 精炼处理时间在 55 ~ 60 min。

## 2.4 连铸工艺

连铸过程采用低拉速浇铸,拉速为 0.57 m/min。结晶器电磁搅拌电流和频率值分别为 250 A 和 2.2 Hz,结晶器液面波动控制在 ±2 mm。中间包钢水的过热度控制在 15 ~ 25 °C。结晶器冷却水流量在 165 m<sup>3</sup>/h,结晶器进出水温差在 4.1 °C,二冷采用弱冷。为了避免第 3 脆性区,进拉矫机铸坯温度控制在 930 °C 以上。S355J2 耐候钢连铸过程采用专用保护渣(如表 1)。保护渣中加入一定量的 R<sub>2</sub>O(B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Li<sub>2</sub>O)可明显降低保护渣的熔点和粘度<sup>[46]</sup>。连铸过程保护渣的消耗为 0.62 kg/t。

## 3 S355J2 钢实物质量分析

现场取 5 炉次 S355J2 耐候钢的 LD、LF、VD、中间包过程和连铸坯钢样,每炉次在连铸 1/2 时刻取两个平行钢样进行分析。

### 3.1 过程氧及夹杂物变化

从图 2 中可以看出,随炼钢、精炼和连铸过程的进行,S355J2 钢水中的全氧含量逐渐降低。LF 精炼结束后,钢水的平均全氧含量降低到  $42 \times 10^{-6}$  以下。VD 精炼过程中钢水中的全氧含量降低  $10 \times 10^{-6}$  以上,幅度较大。VD 真空精炼阶段,钢水中的夹杂物在真空和底吹气体搅拌双重作用下,上浮进入炉渣,促进了钢水全氧含量的降低。S355J2 耐候钢终点连铸坯中全氧含量的平均值在  $22 \times 10^{-6}$ ,不同炉次的波动不大。该工艺条件下,

表 1 保护渣的化学成分及物化性能

Table 1 Analysis and physicochemical properties of mold powder

化学成分/%									R	熔点/ °C	粘度/ Pa·s	液渣层 厚/mm
CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	T. Fe	R <sub>2</sub> O	C	F <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O				
34.8	34.1	5.4	7.63	0.95	6.9	5.89	3.95	0.2	1.02	1128	0.43	9

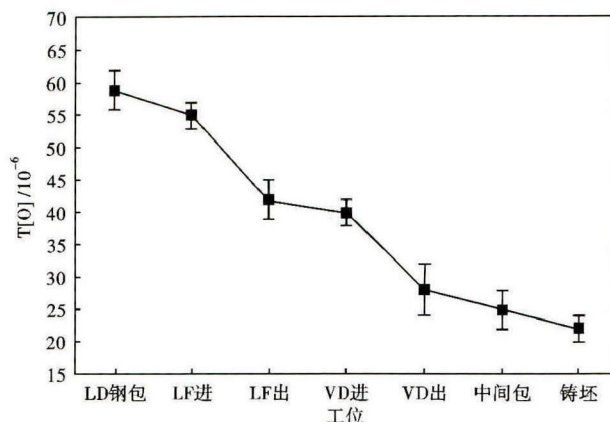


图 2 炼钢连铸过程钢水全氧含量变化

Fig. 2 Change of total oxygen content in steel during steelmaking and concasting process

S355J2 钢水中氧含量的控制效果较好。

从图 3、图 4 中可以看出,随炼钢、连铸过程的进行,钢水中夹杂物的尺寸逐渐减小,S355J2 耐候钢终点钢水中夹杂物的平均直径在 4.6 μm 左右,且大部分为 5 μm 以下的细小夹杂物,在 97.5% 以上。

### 3.2 连铸坯质量

连铸现场未出现粘结漏钢现象,连铸坯表面无清理率达到 95.17%。

研究选取的 5 炉次连铸坯,侧面有一定的震痕,但震痕深度不大。5 炉次连铸坯钢样中,只有 1 块

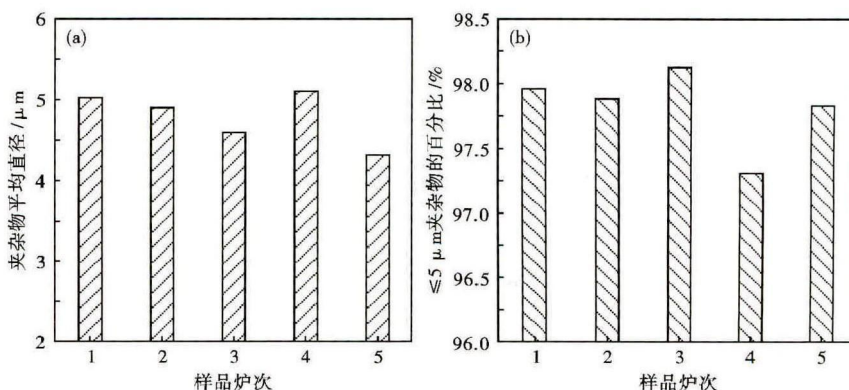


图 3 连铸坯夹杂物平均直径(a)和 0 ~ 5 μm 尺寸夹杂物所占比例(b)

Fig. 3 Average diameter of inclusions (a) and proportion of 0 ~ 5 μm inclusions (b) in casting bloom

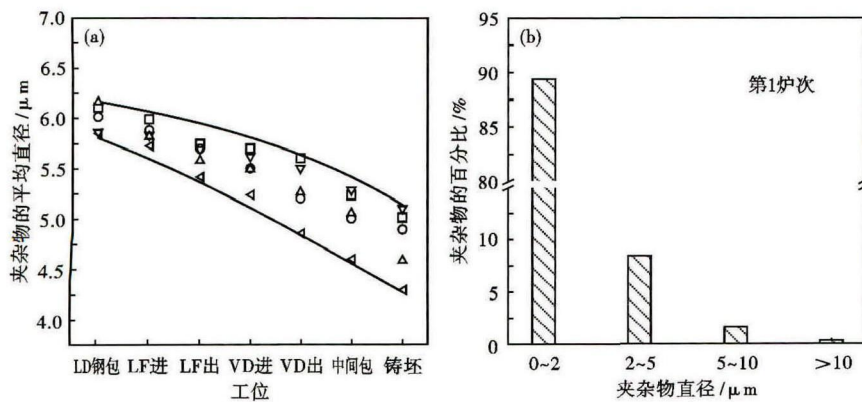


图4 (a) 炼钢连铸过程钢中夹杂物平均直径变化; (b) 连铸坯夹杂物尺寸分布  
Fig. 4 (a) Change of average diameter of inclusions in steel during steelmaking and casting process; (b) Distribution of size of inclusions in casting bloom

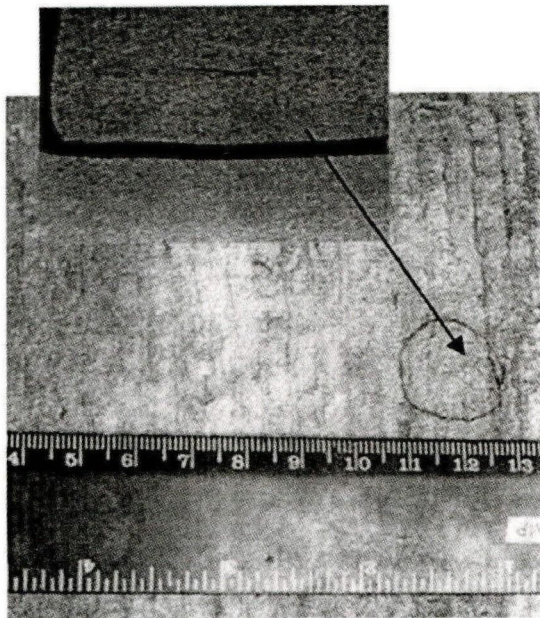


图5 280 mm × 320 mm 铸坯侧面酸洗低倍组织形貌  
Fig. 5 Microstructure morphology of side of pickling 280 mm × 320 mm casting bloom

表2 280 mm × 320 mm 连铸坯低倍组织检验结果/级  
Table 2 Examination results of macrostructure of 280 mm × 320 mm casting bloom /rating

连铸坯号	中心疏松	中心偏析	角部裂纹	边部裂纹	中心裂纹	缩孔
1	1	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1
3	0	1	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	1
5	1	0	0	0	0	0

钢样侧面出现了微小的裂纹(如图5),其余未发现裂纹。对连铸坯钢样表面和内部质量进行评价,具体如表2所示。

低倍组织结果分析表明,个别炉次的连铸坯存

在轻微的缩孔和疏松,级别均在1.0级以下,连铸坯角部和内部未发现明显的裂纹。

综上所述,采用70 t LD-LF-VD-CC 流程生产的 S355J2 耐候钢工艺过程控制较好,连铸坯质量满足控制要求。

#### 4 结论

(1) 采用70 t LD-LF-VD-CC 工艺流程冶炼 S355J2 耐候钢,控制转炉出钢下渣量在2 kg/t-Fe, LF 采用高碱度、高  $Al_2O_3$  含量精炼渣对钢水中夹杂物的去除有利。铸坯的平均全氧含量为  $22 \times 10^{-6}$ ,夹杂物的平均直径为  $4.6 \mu m$ ,  $5 \mu m$  以下细小夹杂物的比例在97.5%以上。

(2) 连铸采用二元碱度  $R = 1.02$ ,  $B_2O_3 + Li_2O$ 、 $MgO$  和  $Al_2O_3$  的质量分数分别为6.9%、5.4%和7.6%的含氟保护渣,连铸坯表面震痕较浅,表面无清理率达到95.17%,未发生粘结漏钢现象。

(3) 通过对连铸坯低倍质量进行分析评价,该流程工艺条件下,S355J2 耐候钢连铸坯缩孔、疏松均为1.0级以下,角部、边部和中心裂纹为0级,满足连铸坯质量的控制要求。

#### 参考文献

- [1] 阴敬甲. S355J2W 耐候钢焊接接头腐蚀性能的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [2] 卢峰华, 许鸿吉, 郭伟, 等. S355J2W + N 耐候钢焊接接头的组织和力学性能[J]. 热加工工艺, 2012, 41(5): 137-139.
- [3] 栾文林, 刘志远, 赵定国. 耐候钢 S355J2W 的研发和工艺实践[J]. 特殊钢, 2014, 35(1): 43-45.
- [4] 孙维, 汪开忠, 文光华, 等. 耐候钢异型坯连铸结晶器保护渣性能优化研究[J]. 钢铁, 2009, 44(9): 28-32.
- [5] Yamauchi A. Heat Transfer Phenomena and Mould Flux Lubrication in Continuous Casting of Steel[D]. Stockholm: KTH, 2001.
- [6] Kenneth C M, Alistair B F. The Role of Mould Fluxes in Continuous Casting-So Simple Yet So Complex[J]. ISIJ International, 2003, 43(10): 1479-1486.

李雪兆(1968-),男,高级工程师,1990年华北理工大学(本科)毕业,炼钢、连铸设计及应用技术开发。

E-mail: zgsiylxz@163.com

收稿日期: 2015-08-27