

耐候钢 S355J2W 的研发和工艺实践

栾文林¹ 刘志远¹ 赵定国²

(1 河北钢铁集团唐钢中厚板公司,唐山 063000; 2 河北联合大学冶金与能源学院,唐山 063009)

摘要 研发的耐候钢 S355J2W (/%: 0.06 ~ 0.10C, 0.20 ~ 0.40Si, 1.00 ~ 1.30Mn, $\leq 0.008S$, $\leq 0.020P$, 0.25 ~ 0.40Cu, 0.30 ~ 0.55Cr, 0.10 ~ 0.30Ni, 0.020 ~ 0.040Nb, 0.020 ~ 0.050Al) 的试生产流程为铁水-120 t 顶底复吹转炉-LF-250 mm × 2 000 mm 板坯连铸-轧制 ≤ 16 mm 板。通过采取控制转炉终点 [C] $\leq 0.05\%$, [P] $\leq 0.015\%$, 精炼时 (FeO) + (MnO) $\leq 1.5\%$, (SiO₂) $\leq 15\%$, 精炼渣碱度 ≥ 3.0 , [Al]_s $\geq 0.025\%$, 按 Ca/Al = 0.06 ~ 0.12, 喂入钙线, 连铸时采用耐候钢专用保护渣 [主要成分/%: 34.0CaO, 28.0SiO₂, 4.6Al₂O₃, $\leq 6(Li_2O + B_2O_3)$], 控制开坯温度 1 010 ~ 1 060 °C 等工艺措施, ≤ 16 mm 耐候钢 S355J2W 成品板铝含量为 0.025% ~ 0.035%, 钢中平均氧含量为 21×10^{-6} , 平均氮含量为 31×10^{-6} , 钢中非金属夹杂物的尺寸基本 $\leq 14 \mu m$, 各项冶金质量指标合乎要求。

关键词 耐候钢 S355J2W 120 t BOF-LF-板坯 CC 流程 研发 工艺实践

Development and Process Practice of Weathering Steel S355J2W

Luan Wenlin¹, Liu Zhiyuan¹ and Zhao Dingguo²

(1 Tangshan Heavy Plate Co Ltd, Hebei iron and Steel Group, Tangshan 063000;
2 College of Metallurgy and Energy, Hebei United University, Tangshan 063009)

Abstract The pilot production flow sheet for developed weathering steel S355J2W (/%: 0.06 ~ 0.10C, 0.20 ~ 0.40Si, 1.00 ~ 1.30Mn, $\leq 0.008S$, $\leq 0.020P$, 0.25 ~ 0.40Cu, 0.30 ~ 0.55Cr, 0.10 ~ 0.30Ni, 0.020 ~ 0.040Nb, 0.020 ~ 0.050Al) is hot metal-120 t top and bottom combined blown converter-LF-250 mm × 2 000 mm slab CC- ≤ 16 mm plate rolling process. With using the process measures including controlling converter end [C] $\leq 0.05\%$ and [P] $\leq 0.015\%$, in refining (FeO) + (MnO) $\leq 1.5\%$, (SiO₂) $\leq 15\%$, refining slag basicity ≥ 3.0 , [Al]_s $\geq 0.025\%$ and feeding calcium wire according Ca/Al = 0.06 ~ 0.12, in casting using special-purpose mold shielding flux for weathering steel [main ingredient/%: 34.0CaO, 28.0SiO₂, 4.6Al₂O₃, $\leq 6(Li_2O + B_2O_3)$], controlling breakdown temperature 1 010 ~ 1 060 °C, the aluminium content in ≤ 16 mm finished plate of weathering steel is 0.025% ~ 0.035%, the average oxygen content in steel is 21×10^{-6} and the average nitrogen content in steel is 31×10^{-6} , the size of nonmetallic inclusions in steel normally $\leq 14 \mu m$, and the each metallurgy quality index meets the requirement of standard.

Material Index Weathering Steel S355J2W, 120 t BOF-LF-Slab CC Flow Sheet, Development, Process Practice

与普碳钢相比, S355J2W 耐候钢具有较高的强度、良好的耐大气腐蚀能力和较高的冲击韧性等优点,可降低车辆自重增加载重、延长检修周期、提高车辆使用寿命^[1]。欧标耐候钢 S355J2W 性能要求较高,生产工艺要求严格,生产难度较大^[2]。

耐候钢的工艺流程为 1 780 (1 580) m³ 高炉铁水-120 t 顶底复吹转炉-120 t LF 精炼-板坯连铸机-加热炉-3500 mm 轧机。其中,工作拉速为 0.81 m/min,铸坯断面尺寸为 250 mm × 2 000 mm,中间包公称容量 38 t。

1 耐候钢 S355J2W 化学成分

耐候钢与碳钢相比具有较好的耐大气腐蚀性能是因为在其表面形成了致密的内锈层,这种内锈层阻碍了腐蚀介质进入基体,而在碳钢表面形成的存在微裂纹的疏松锈层不利于对基体的保护^[3]。而耐候钢之所以有良好的抗腐蚀能力也和合金元素

(Cu, Cr, Ni 等)的作用有关^[4]。在成分设计时主要考虑以下 3 个方面:(1)耐大气腐蚀性能;(2)强度和韧性;(3)焊接性能和成型性能。

C 的控制一般考虑韧性和焊接性,对于焊接结构用耐候钢 S355J2W,将 C 控制在 0.10% 以下,其强度不足之处由 Nb 等微合金元素弥补,以满足在低温下的抗冲击能力。

Cu 是提高耐候钢耐蚀性最有效的合金元素,含量一般控制在 0.25% ~ 0.45%。

Ni 可提高 Cu 固溶体的熔点,在钢中加入超过 Cu 含量一半的 Ni 可改善轧制过程中 Cu 引起的热裂纹现象。

P 虽然能明显提高钢的耐腐蚀性,但是对于焊接结构用耐腐蚀钢而言,会恶化钢的韧性,降低钢的低温冲击能力。S355J2W 耐候钢要求 -20 °C 冲击性能,因此该钢种对 P 采用较低的含量,含 P 量控制在 0.020% 以下。耐候钢中 Cr 含量一般为 0.4% ~

表 1 耐候钢 S355J2W 的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of weathering steel S355J2W / %

标准	C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Ni	Nb	Alt
EN 10025-5-2004	≤0.19	≤0.55	0.45~1.60	≤0.035	≤0.035	0.20~0.60	0.35~0.85	≤0.70	0.010~0.065	≥0.020
内控	0.06~0.10	0.20~0.40	1.00~1.30	≤0.008	≤0.020	0.25~0.40	0.30~0.55	0.10~0.30	0.020~0.040	0.020~0.050

1.2%,同时 Cr 元素具有较好的耐腐蚀性能。

耐候钢 S355J2W 成分设计见表 1。

2 生产工艺过程控制和实物成品质量

2.1 转炉工艺

在转炉冶炼的高温条件下(1500~2000 K),Cu 的氧化物为 Cu_2O ,Ni 元素的氧化产物为 NiO。为了分析比较炼钢过程及铜、镍氧化精炼过程中元素的氧化规律,可绘制成铁液中元素被氧气直接氧化或被溶解态的氧间接氧化的氧势图,如图 1 所示。

由图 1 可以看出,[Cu]、[Ni]氧化的 $\Delta_r G^0$ 线均在[Fe]线之上,因此从热力学角度讲,吹氧时上述元素均不被氧化,而被[Fe]保护起来。在冶炼耐候钢 S355J2W 时,采用铜板和镍板配 Cu 和 Ni,随废钢一起加入炉内,参考吸收率 98%。

钢水终点成分 $C \leq 0.05\%$, $P \leq 0.015\%$,出钢温度 1620~1640 °C;出钢过程加入其他合金,调整 Si、Mn、Cr 等主要成分,出钢过程严禁下渣,出钢后加入合成渣。

2.2 LF 精炼工艺

唐钢中厚板公司无铁水预处理设备,因此 LF 精炼时的初始钢水 S 含量相对较高,在冶炼低 S 钢时难度相对较大。为达到耐候钢成品 S 含量 < 0.008% 的要求,除了常规的适当增加渣量、提高转

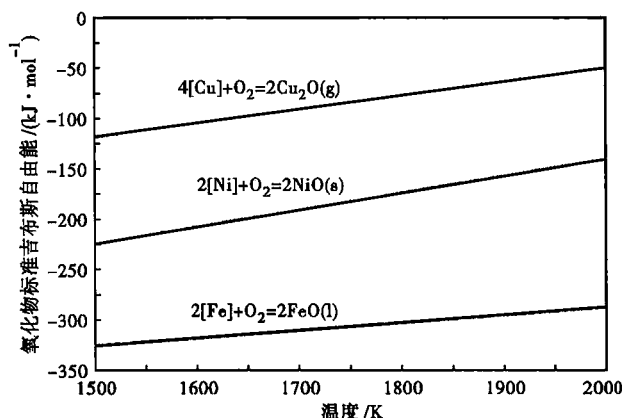


图 1 溶解于铁液中元素直接氧化的标准吉布斯生成自由能 $\Delta_r G^0$ 与温度关系图

Fig.1 Relationship between standard Gibbs free energy formation for direct oxidation of elements solubilizing in liquid $\Delta_r G^0$ and temperature

炉出钢温度,提高炉渣碱度外,根据耐候钢品种实际情况,主要采取的措施为降低钢水氧化性,增加钢中酸溶铝含量。

除了碳、硅含量较高的钢种外,一般钢中硫活度系数接近 1, $\alpha_{[S]}$ 可由[S]代替,于是:

$$L_S = (S)/[S] = C_S/\alpha_{[O]} \quad (1)$$

式中: L_S -硫在渣和钢中的分配比; C_S -硫容量。

由(1)式可见,硫容量增加到 n 倍与氧活度降低到 $1/n$ 对硫分配比的影响是等效的。

钢水的脱氧和脱硫之间存在以下规律:

$$[S] = 30 \alpha_{[O]} \quad (2)$$

式中: $\alpha_{[O]}$ -钢水中氧的活度。

实践表明,钢中 $[Al]_s < 70 \times 10^{-6}$,钢水中氧含量 $> 20 \times 10^{-6}$,不利于脱硫,若钢中 $[Al]_s$ 达到 300×10^{-6} 时,钢中氧含量在 $2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$,脱硫率显著提高。因此,实际生产中耐候钢中 $[Al]_s$ 要求大于 250×10^{-6} 。

控制 $(FeO) + (MnO) \leq 1.5\%$ 、 $(SiO_2) \leq 15\%$ 、碱度 ≥ 3.0 ,LF 出钢前喂铝线调整钢中 $[Al]_s$ 在 $0.020\% \sim 0.040\%$,按 $Ca/Al = 0.06 \sim 0.12$ 喂入钙线,处理后软吹 ≥ 10 min。LF 精炼渣成分见表 2。

2.3 连铸工艺

耐候钢中由于 Cu、Ni 等合金元素含量较高,使得该钢种在冷却过程中产生的热应力和组织应力也较大^[5]。

该钢种生产时,结晶器冷却采用弱冷,提高结晶器冷却水的进水温度同时适当降低冷却水的流速。

连铸坯在矫直时,内弧受到张应力,由于振痕的缺口效应而产生应力集中。如果二次冷却太强,矫直时铸坯表面温度低于 900 °C,刚好位于第 3 脆性区 600~900 °C,再有 AlN 等质点在晶界析出降低钢的延展性,因此在矫直力作用下就会振痕波谷处出现表面横裂纹。根据上述原则,首先,二冷区 4~6 段边部水嘴口径由原来的 3.6 mm 减小为 1.8 mm;其次,各断面 3~8 段、弯曲段增加辅切阀门,最边部的水嘴使用控制阀门降低水量。

耐候钢生产的连铸工序中,结晶器保护渣采用

专用保护渣。为了降低表面裂纹发生率,采用了较高析晶率的保护渣,但析晶率较高会导致保护渣润滑效果下降,容易粘结漏钢。因此,在含铝钢保护渣的基础上进一步优化保护渣性能,向渣中加入 B_2O_3 和 Li_2O 等组元,以提高其对 Al_2O_3 的适应能力,改善保护渣的熔化性能和流动性能,形成耐候钢专用保护渣,指标如表3。

经过实践探索出的合理控制参数为 S355J2W 钢种的液相线温度为 $1520\text{ }^\circ\text{C}$, 中间包过热度按 $15\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ 控制;采用耐候钢专用保护渣;结晶器液面控制保持稳定,液面波动范围在 $\pm 2\text{ mm}$;铸坯进拉矫机温度 $\geq 920\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.4 轧制工艺

要减轻和避免铜脆,主要通过控制加热过程中的工艺参数^[6]。因此需选择性氧化,尽量避开“铜脆”的临界温度($1075\sim 1125\text{ }^\circ\text{C}$),抑制铜在奥氏体晶界的富集。生产 S355J2W 耐候钢时,直接热送铸坯,减少二次加热造成的铜在晶界富集。实际生产温度控制如表4。

2.5 钢材实物质量分析

钢中铝含量控制在 $0.025\%\sim 0.035\%$, 钢中 O、N 含量分别达到 $13\times 10^{-6}\sim 32\times 10^{-6}$ 、 $25\times 10^{-6}\sim 36\times 10^{-6}$, 平均值分别为 21×10^{-6} 、 31×10^{-6} 。

表2 LF 精炼渣主要成分 / %

CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃
45~55	12~15	8~10	15~20

表3 耐候钢保护渣成分、熔点和碱度

Table 3 Ingredient, melting point and basicity of mold shielding flux for weathering steel

保护渣成分 / %						熔点 / °C	碱度 (R)
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	(Li ₂ O + B ₂ O ₃)		
34.0	28.0	4.6	1.2	3.7	<6	1065	1.2

表4 耐候钢 S355J2W 的轧制参数 / °C

Table 4 Parameters of rolling for weathering steel S355J2W / °C

出炉温度	开轧温度	二次开轧温度	终轧温度
1200	1010~1060	<900	800~850

表5 ≤16 mm 耐候钢 S355J2W 成品板材力学性能

Table 5 Mechanical properties of ≤16 mm finished plate of weathering steel S355J2W

项目	R _{oH} / MPa	R _m / MPa	A / %	纵向冲击功 (-20 °C) / J
标准	≥355	470~630	≥22	≥27
范围	392~515	517~589	22.5~33.5	93~356
平均	451	551	28.71	245

对 $250\text{ mm}\times 2000\text{ mm}$ 铸坯进行取样分析,铸坯表面及横截面酸浸低倍组织上目视无可见的缩孔、气泡、裂纹、夹杂、白点、晶间裂纹等缺陷。酸浸低倍组织无中心疏松,中间 C 偏析 1.0。钢中非金属夹杂物 A、B 类控制在 1.5 级以下, C、D 类控制在 1.0 级以下,夹杂物尺寸基本控制在 $14\text{ }\mu\text{m}$ 以内。对钢中夹杂物进行扫描电镜及能谱分析,结果表明,夹杂物种类主要为尺寸细小的钙铝酸盐夹杂。

钢材组织的致密性、均匀性较好,洁净度较高。

耐候钢力学性能检验包括冲击功、拉伸试验等。成品板材厚度 $\leq 16\text{ mm}$, 其力学性能合格,满足用户需要,实物力学性能如表5所示。

3 结论

(1) S355J2W 钢设计成分 (%) 为 $0.06\sim 0.10\text{C}$, $0.20\sim 0.40\text{Si}$, $1.00\sim 1.30\text{Mn}$, $\leq 0.008\text{S}$, $\leq 0.020\text{P}$, $0.25\sim 0.40\text{Cu}$, $0.30\sim 0.55\text{Cr}$, $0.10\sim 0.30\text{Ni}$, $0.020\sim 0.040\text{Nb}$, $0.020\sim 0.050\text{Al}$ 。

(2) LF 工序通过降低钢水氧化性,控制钢中 Als 含量大于 250×10^{-6} , 实现钢水 S 含量 $< 0.008\%$;连铸工序控制结晶器水温差和矫直温度,使用耐候钢专用保护渣;板坯加热时,控制加热炉温度,避开“铜脆”的临界温度($1075\sim 1125\text{ }^\circ\text{C}$)。

(3) 研发的 S355J2W 钢材致密性、均匀性较好,洁净度较高,力学性能合格。C、Si、Mn 等主要元素含量基本实现窄成分控制, P、S 及残余元素控制在较低水平;钢中铝含量控制在 $0.025\%\sim 0.035\%$, 钢中 O、N 含量平均值分别为 21×10^{-6} 、 31×10^{-6} ;钢中非金属夹杂物尺寸基本控制在 $14\text{ }\mu\text{m}$ 以内。

河北省自然科学基金项目资助(E2013209113)

参考文献

- [1] 阴敬甲. S355J2W 耐候钢焊接接头腐蚀性能研究[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] 肖葵,董超芳,李晓刚,等. 大气腐蚀下耐候钢的初期行为规律[J]. 钢铁研究学报,2008,20(10):53-58.
- [4] 林翠,李晓刚,刘晓东. 碳钢和耐候钢在北京城市大气环境中初期腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报,2005,25(4):193-199.
- [5] 汪洪峰,郭振和,蒋家和. 耐候钢连铸工艺的改进[J]. 上海金属,2004,26(2):26-28.
- [6] 李娜. 铜在钢中的作用综述[J]. 辽宁科技大学学报,2011,34(2):157-161.

栾文林(1982-),男,硕士(河北理工大学),工程师,2005年河北理工大学(本科)毕业,炼钢新技术研究。

E-mail:lw1_ts@163.com

收稿日期:2013-09-04