

100 t EAF-LF-RH-CC 流程生产洁净管线钢的工艺实践

武守防 马全峰 贺冰林

(天津钢管集团特钢公司,天津 300301)

摘要 天津钢管公司 X65 等洁净管线钢的生产流程为 100 t UHP EAF-LF-RH- Φ 310 mm ~ Φ 500 mm CC 工艺。通过电弧炉配加 35% ~ 40% 铁水,控制 Al 消耗量 1.85 kg/t 时渣量不低于 22 kg/t,控制精炼渣指数 (CaO/SiO₂/Al₂O₃) 0.18 ~ 0.32, RH 喷粉脱硫,电弧炉终点 [C] \geq 0.05%,熔清钢水磷含量 \leq 0.005%,延长泡沫渣持续时间, RH 高真空处理时间 \geq 10 min,钙处理后软搅拌 10 ~ 15 min,使用高碱度中间包覆剂等措施可使 10MnVNbMo 等 X65 管线用无缝钢管的洁净度达 \leq 0.001% S, \leq 0.008% P, \leq 75 \times 10⁻⁶ N, \leq 20 \times 10⁻⁶ O, \leq 1.5 \times 10⁻⁶ H。

关键词 100 t EAF-LF-RH-CC 管线钢 洁净度

Technology Practice for Clean Pipeline Steel Steelmaking by 100 t EAF-LF-RH-CC Flow Sheet

Wu Shoufang, Ma Quanfeng and He Binglin

(Special Steel Co, Tianjin Pipe Group, Tianjin 300301)

Abstract The production flow sheet for X65 etc. clean pipeline steel at Tianjin Pipe is 100 t UHP EAF-LF-RH- Φ 310 ~ Φ 500 mm CC process. With using the process measures including charging 35% ~ 40% hot metal in arc furnace, controlling slag amount no less than 22 kg/t at Al consumption 1.85 kg/t, controlling refining slag index (CaO/SiO₂/Al₂O₃) 0.18 ~ 0.32, RH powder injection for desulphurization, EAF end [C] \geq 0.05%, phosphorus content in melting down liquid \leq 0.005%, prolonging foaming slag maintaining time, RH high vacuum treated time \geq 10 min, soft stirring for 10 ~ 15 min after calcium treatment and using high basicity shielding agent in tundish, the cleanliness of 10MnVNbMo etc seamless steel tube of X65 pipeline steel is \leq 0.001% S, \leq 0.008% P, \leq 75 \times 10⁻⁶ N, \leq 20 \times 10⁻⁶ O, and \leq 1.5 \times 10⁻⁶ H.

Material Index 100 t EAF-LF-RH-CC, Pipeline Steel, Cleanliness

为满足现代工业对钢的性能越来越高的要求,各大钢铁企业也越来越重视对洁净钢生产技术的研究。所谓洁净钢一般是指钢中杂质元素磷、硫、氧、氮、氢(有时包括碳)和非金属夹杂物含量很低的钢,随着科技的进步和钢种、用途的不同,对洁净钢的要求也不尽相同^[1-3]。特别是 20 世纪 80 年代以来,随着铁水预处理和二次精炼技术的发展,钢水洁净度得到很大提高^[4]。天津钢管公司 100 t EAF-LF-RH-CC 生产线于 2009 年投产使用,本文主要介绍了该生产线自投产以来在 X65 等洁净管线钢工艺实践中的进展。

1 管线用洁净钢有害元素的控制

EAF、LF、RH、CC(连铸机)主要技术参数见表 1。

1.1 硫

钢中硫是有害杂质,硫对钢材最大的危害是引起钢的热脆。在我国西南和西北的很多油田都是一些 H₂S 气体含量较高的油气田, H₂S 气体大量生成的氢通过应力诱导,向钢中夹杂物及某些缺陷部位扩散聚集形成高压,造成应力集中,最后导致钢材开

表 1 主要冶炼设备的技术参数
Table 1 Technical parameters of main steelmaking unit

设备	项目	参数
EAF	公称容量/t	100
	炉壳直径/mm	6 400
	变压器额定容量/MVA	100
	KT 氧枪氧气流量/(m ³ ·h ⁻¹)	最大 4 \times 2 500
LF	公称容量/t	100
	加热速度/($^{\circ}$ C·min ⁻¹)	3 ~ 5
	变压器额定容量/MVA	16
	电极直径/mm	Φ 400
RH	真空槽外径/mm	2 460
	浸渍管内外径/mm	450/1 040
	顶枪吹氧量/(m ³ ·h ⁻¹)	1 500 ~ 2 000
	真空泵抽气量/(kg·h ⁻¹)	500
CC (连铸机)	弧形半径/m	14
	圆坯断面/mm	Φ 310 ~ Φ 500
	拉坯速度/(m·min ⁻¹)	0.35 ~ 1.10
	流数	1 机 5 流

裂。因此,高钢级抗腐蚀系列石油套管所用钢要具有较高的抗硫应力裂纹(SSCC)能力,一般要求控制钢中[S] \leq 10 \times 10⁻⁶, [H] \leq 2 \times 10⁻⁶。

1.1.1 钢水深脱氧和大渣量

从脱硫反应的热力学机理式(1)来看,降低钢水的氧活度,增大渣量将会促使钢水中的硫向炉渣

中转移^[5]。在超低硫钢的工业生产中使用定氧仪对精炼结束后的钢水进行定氧测定,钢水中氧活度可控制到 2.5×10^{-6} 以内,要想降低氧活度就必须提高喂铝量,铝消耗量大有利于钢水深脱氧,但过高的渣量和铝消耗量会导致企业生产成本上升。从图 1 的工业试验结果可以看出,渣量在 22 kg/t 左右,铝消耗量达到 1.85 kg/t 时,就能达到深脱硫的效果^[6]。

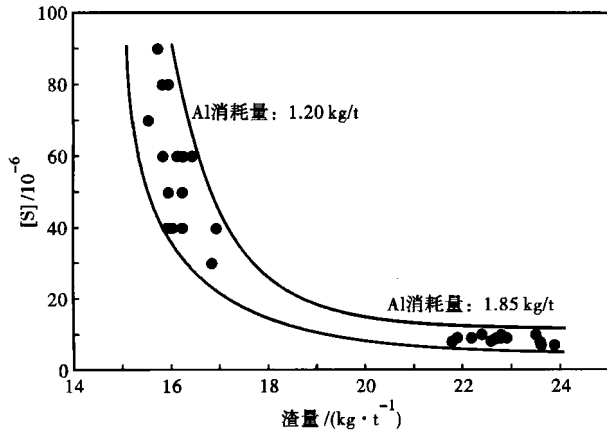
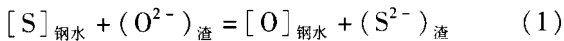


图 1 渣量和 Al 消耗量对成品硫的影响

Fig. 1 Effect of slag amount and Al consumption on sulphur content in finished steel



1.1.2 炉渣指数和炉渣氧化性

在生产极低硫钢时,要尽可能降低钢包中顶渣的氧化性,否则,顶渣将会不断与钢水进行氧交换,从而导致钢水脱硫困难。从大批量工业生产结果来看,绝大部分炉次精炼终渣的 (FeO + MnO) 控制在 0.60% 以内,少部分炉次 (FeO + MnO) 控制在 0.80% 以内,基本满足了极低硫钢的生产要求。从脱硫反应的热力学机理来看,要想深脱硫,碱度必须高,此外渣子流动性要好,有利于钢水和顶渣进行硫交换,但是碱度过高,必然会导致顶渣流动性变差,所以碱度和流动性应兼顾。

从图 2 的工业试验结果来看,炉渣指数(用渣中 CaO/SiO₂/Al₂O₃ 三种物质百分含量的比值表示炉渣指数)在 0.18 ~ 0.32 时,炉渣脱硫效果最好^[5]。

1.1.3 入炉料原始硫含量

转炉生产线生产超低硫钢时可以通过铁水预处理降低入炉料原始硫含量,而电弧炉生产线大部分炉料为废钢,有些企业兑入一定比例的铁水,脱硫压力全部集中在精炼工序,因此电弧炉生产线必须尽

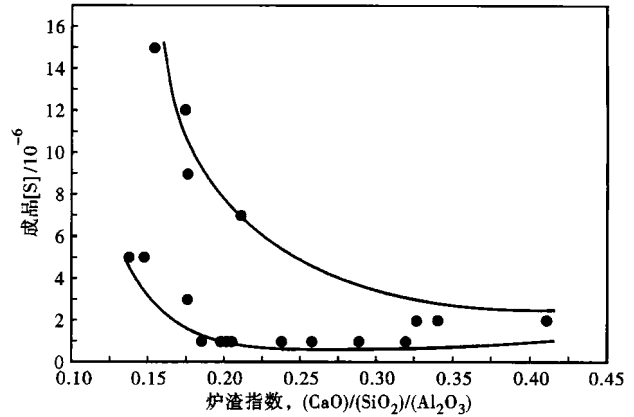


图 2 炉渣指数 (CaO/SiO₂/Al₂O₃) 对成品硫的影响

Fig. 2 Effect of refining slag index (CaO/SiO₂/Al₂O₃) on sulphur content in finished steel

可能降低入炉料硫含量,天津钢管公司在生产超低硫钢时电弧炉熔清硫含量一般在 0.025% ~ 0.038%,废钢中添加返回管头 20 ~ 30 t,铁水兑入量在 40 ~ 49 t,精炼钢水初始硫含量在 0.003% ~ 0.013%。另外为保证钢渣充分进行硫交换,钢包良好的氩气搅拌必不可少。

1.1.4 RH 喷粉脱硫

利用 RH 顶枪喷粉脱硫的设备优势,可采取喷粉脱硫。每炉钢喷粉 500 kg,可降低硫含量 0.0005%,RH 结束钢中硫含量可控制在 0.0010% 之内。但由于粉剂含一定量的萤石,对真空槽耐火材料侵蚀严重,除非必要,一般不进行喷粉脱硫操作。

1.2 磷

脱磷反应的热力学机理表明,脱磷反应在低温,高氧化性,大渣量的条件能较快脱除。

天津钢管公司在生产低磷钢时主要做法为:在废钢料篮底部添加石灰和氧化铁皮制作的铁磷球,强化冶炼前期低温脱磷,电弧炉石灰总加入量在 8 ~ 9 t,冶炼过程中进行放渣操作,电弧炉熔清样磷含量一般控制在 0.005% 以内,由于废钢质量不够稳定,每一炉钢水收得率也不一样,废钢的加入量必须确保足够的留钢量,避免下渣;又因电弧炉自身设备的局限性,出钢口后期尽量不要安排低磷钢生产,避免出钢口过大导致下渣。出钢前渣样成分(/%): 47 ~ 52CaO、25 ~ 41TFe、13 ~ 18SiO₂,碱度控制在 2.5 ~ 3.1,成品管中的磷含量可以控制在 0.008% 以内。

1.3 氮、氧、氢

近几年来,随着管线钢的大量开发,对钢中氮、

氢、氧等气体的要求也越来越严格,氮的存在会降低钢的塑性,导致焊接等性能变差,一般来说,高钢级的无缝管线用钢都要求 $[N] \leq 100 \times 10^{-6}$,甚至低于 80×10^{-6} , $[H] \leq 2.0 \times 10^{-6}$, $[O] \leq 20 \times 10^{-6}$ 。

对于氮和氢的去除,电弧炉生产线主要从以下几个方面入手:

(1)电弧炉原材料以废钢为主,与铁水相比,废钢中的氮含量偏高,生产高钢级管线钢时,增加铁水兑入比例,按 35% ~ 40% 加入。

(2)电弧炉在泡沫渣较好的时期采用高电压级数送电尽快升温,脱碳后期增大碳枪喷吹流量,延长泡沫渣持续时间,减少电弧裸漏造成的钢液增气。

(3)精炼处理期间,确保氩气搅拌强度适度,避免钢液面裸漏吸气,RH 高真空处理时间确保 ≥ 10 min,连铸钢包长水口采用氩气保护。

经过这些措施,天津钢管生产的 X65 高钢级无缝管用钢,氮含量可以控制在 80×10^{-6} 以内,氢控制在 1.5×10^{-6} 以内。

除一些低碳管线钢以外,氧的控制措施为:

(1)电弧炉出钢碳尽量按 0.05% 以上控制,出钢前往炉中加 500 kg 铁碳合成球降低钢水过氧化,电弧炉终点氧含量基本在 $(450 \sim 700) \times 10^{-6}$ 波动。

(2)精炼处理期间,确保钢包全流程氩气搅拌强度适度,减少钢液面裸漏吸气,对钢水进行深脱氧,使用定氧仪对精炼结束后的钢水进行定氧测定,钢水中氧活度可控制到 2.5×10^{-6} 以内。加强对精炼顶渣的扩散脱氧,造高碱度渣子,绝大部分炉次精炼终渣的 $(FeO + MnO)$ 控制在 0.60% 以内,精炼终渣主要成分为 (%): 52.3 ~ 58.7CaO、6.5 ~ 11.2SiO₂、22.6 ~ 28Al₂O₃、4 ~ 9MgO,碱度大于 5。

(3)RH 高真空处理 10 min,钙处理结束弱搅拌 10 ~ 15 min。

(4)连铸钢包长水口全流程吹氩,使用较高碱度中间包覆盖剂。

采取这些措施后,以 X65 无缝钢管管线用钢为例,铸坯全氧含量可控制在 20×10^{-6} 以内,少部分炉次可控制在 15×10^{-6} 以内,成品管中 B 类夹杂物可控制在 1.0 级以内。

1.4 Cu、Pb、Sn、As 等残余元素的控制

Cu、Pb、Sn、As 等元素由于熔点低,在铸坯凝固过程中易造成铸坯产生裂纹,由于废钢等原材料来源复杂,一般对这几种元素有特殊要求的钢种要增加铁水和返回管头的加入比例,成品中这几种元素可控制在 $Cu \leq 0.08\%$, $Pb \leq 0.001\%$, $Sn \leq$

0.0050% , $As \leq 0.0050\%$ 。

2 典型钢种洁净度控制水平

以对洁净度要求较高的 X65 钢级无缝钢管管线用钢 10MnVNbMo 为例来说明,其洁净度要求为 (%): 0.08 ~ 0.11C、 $\leq 0.010P$ 、 $\leq 0.0015S$ 、 $\leq 0.0100N$ 、 $\leq 0.0025O$ 、 $\leq 0.0002H$ 。

主要成分各工序控制水平:碳- EAF 出钢前控制在 0.05% 以内,最低达到 0.024%,RH 结束控制在 0.08% ~ 0.10%。磷- EAF 出钢前控制在 0.005% 以内,最低达到 0.0029%,LF 结束控制在 0.007% 以内,RH 结束控制在 0.008% 以内。硫- EAF 出钢前控制在 0.035% 以内,LF 结束控制在 0.0015% 以内,RH 喷粉结束可控制在 0.0010% 之内,最低可达到 0.0007%。氮- RH 结束可控制在 0.0070% 以内,最低达到 0.0034%,平均达到 0.0054%,中间包钢水可控制在 0.0075% 以内。氧- EAF 出钢前基本在 0.045% ~ 0.075% 波动,中间包钢水全氧可控制在 0.0020% 以内,最低可达到 0.0010%,平均为 0.00152%。氢- 中间包钢水氢可控制在 0.00015% 以内。

3 结论

(1)经过近几年的不断生产实践,天津钢管公司在洁净钢领域取得了很大进步,提升了公司的竞争力。

(2)以高钢级无缝管用钢 10MnVNbMo 为例,钢水洁净度可控制在 (%): $S \leq 0.001$ 、 $P \leq 0.008$ 、 $N \leq 75 \times 10^{-6}$ 、 $H \leq 1.5 \times 10^{-6}$ 、 $O \leq 20 \times 10^{-6}$ 。

参考文献

- [1] Bennenberg N. Combined Decrease of Sulphur, Nitrogen, Hydrogen and Totaloxygen in Only One Secondary Steelmaking Operation[J]. Steel Research, 1992, 63(10): 430-432.
- [2] 蔡开科. 钢洁净度的控制[C]. 第十届全国炼钢学术会议论文集. 郑州, 1998: 70.
- [3] 蔡开科, 张立峰, 刘中柱. 纯净钢生产技术及现状[J]. 河南冶金, 2003, 11(4): 3-6.
- [4] 蒋国昌. 纯净钢及二次精炼[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1995: 12.
- [5] Richardson F D. Physical Chemistry of Melts in Metallurgy[J]. Academic Press, London, 1974, 2: 291.
- [6] 马全峰, 武守防. 150 t EAF-LF-VD-CC 流程生产超低硫钢的工艺实践[J]. 特殊钢, 2012, 33(1): 32-34.

武守防(1976-),男,硕士,2006年北京科技大学毕业,电弧炉炼钢工艺技术研究。

收稿日期:2012-07-25