

避免原辅料对 KB-150 t BOF-RH-CC 流程 MA 超低碳钢水增碳的生产实践

邓力¹ 彭其春¹ 宋佳霖¹ 邱雷¹ 盛喜松² 邓品团²

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081; 2 武汉钢铁(集团)公司, 武汉 430083)

摘要 MA 超低碳钢($\%: \leq 0.005\text{C}, 0.007 \sim 0.012\text{Si}, 0.07 \sim 0.15\text{Mn}, \leq 0.025\text{P}, \leq 0.025\text{S}, \leq 0.035\text{Als}, \leq 0.002\text{ON}$)的生产流程为 KB-150 t BOF(终点 $[\text{C}] \leq 0.020\%$)-RH-200 mm 板 CC 工艺。试验分析了结晶器保护渣, 中间包覆盖剂, 钢包耐火材料对钢液增碳量影响。结果表明, 结晶器增碳量($\Delta\text{C} 0.0003\% \sim 0.0008\%$)明显高于中间包增碳量($\Delta\text{C} 0.0001\% \sim 0.0005\%$), 通过稳定冶金操作, 控制保护渣原始碳量为 1%~2%, 向保护渣中添加 MnO_2 (3.5%~4.0%), 控制覆盖剂量等工艺措施, 可有效地减少钢液增碳。

关键词 MA 超低碳钢 KB-150 t BOF-RH-CC 流程 结晶器保护渣 中间包覆盖剂 钢水增碳

Production Practice of Avoiding Raw and Supplement Materials on Increase Carbon in MA Ultra-Low Carbon Steel Liquid during KB-150 t BOF-RH-CC Flowsheet

Deng Li¹, Peng Qichun¹, Song Jialin¹, Qiu Lei¹, Sheng Xisong² and Deng Pintuan²

(1 Key Laboratory for ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Wuhan Iron and Steel (Group) Co, Wuhan 430083)

Abstract The production flowsheet for MA ultra-low carbon steel ($\%: \leq 0.005\text{C}, 0.007 \sim 0.012\text{Si}, 0.07 \sim 0.15\text{Mn}, \leq 0.025\text{P}, \leq 0.025\text{S}, \leq 0.035\text{Als}, \leq 0.002\text{ON}$) is KB-150 t BOF (end $[\text{C}] \leq 0.020\%$)-RH-200 mm slab CC flowsheet. The effect of mold flux, tundish shielding agent and ladle refractory materials on incremental carbon content in liquid has been tested and analyzed. Results show that the incremental carbon content in liquid in mold ($\Delta\text{C} 0.0003\% \sim 0.0008\%$) is obviously higher than in tundish ($\Delta\text{C} 0.0001\% \sim 0.0005\%$), through using the measures including defining metallurgy operation, controlling initial carbon content in mold flux 1%~2% and adding 3.5%~4.0% MnO_2 in flux, controlling the amount of tundish shielding agent, it is available to decrease the incremental carbon content in liquid.

Material Index MA Ultra-Low Carbon Steel, KB-150 t BOF-RH-CC Flowsheet, Mold Flux, Tundish Shielding Agent, Incremental Carbon Content in Liquid

碳对超低碳钢的性能影响很大, 而增碳主要来自结晶器保护渣中的碳^[1-2], 控制保护渣熔化速度和结构, 同时作为其骨架粒子的碳质材料进入钢液, 会引起结晶内钢液增碳, 恶化铸坯质量^[3-4]。出钢后在钢液面加一定量的覆盖剂进行保温, 防止钢液二次氧化^[5], 中间包覆盖剂中的碳有少部分随液滴进入液渣层, 其中大部分会形成富集碳层, 富集碳层和液渣中的碳会造成钢液增碳^[6], 同时, 碳复合耐火材料中一般含有 3%~30% 的碳^[7], 也会对钢液增碳。

20 世纪 90 年代以来, 钢厂通过选择合适的包衬材料, 控制保护渣、中间包覆盖剂等相关材料的含碳配比, 稳定连铸操作工艺, 减少液面波动对钢水增碳的影响, 控制钢液增碳 $\leq 3 \times 10^{-6}$ 的比例在 73% 左右。

试验钢种的 MA 化学成分见表 1, 试验工艺流程为 KB-转炉冶炼-RH-CC, 钢包容量为 150 t, 中间

表 1 MA 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of MA steel / %

C	Si	Mn	P	S	Als	N
≤ 0.005	0.007 ~ 0.012	0.07 ~ 0.15	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.035	≤ 0.0020

包容量 20 t, 200 mm × (1 020 ~ 1 320) mm 铸坯, 转炉终点 $[\text{C}] \leq 0.020\%$, 取某一浇次的 6 炉钢统计分析钢厂 2012 年 1 月份到 7 月份生产的 MA 钢数据, 提出相应的增碳控制措施, 提高超低碳钢增碳稳定性。

1 铸坯取样对碳含量的影响因素

1.1 铸坯取样

铸坯样在皮下 10 mm, 中心偏析带和 1/4 区域截取。分 3 层取样, 测量成品的碳含量。第 1 层为表层, 表层经研磨后, 钻屑测量表层的碳含量, 磨到厚度 1/4 处, 钻屑测量 1/4 处碳含量; 磨到厚度的中心部, 钻屑测量中心部的碳含量。取样示意图如图 1

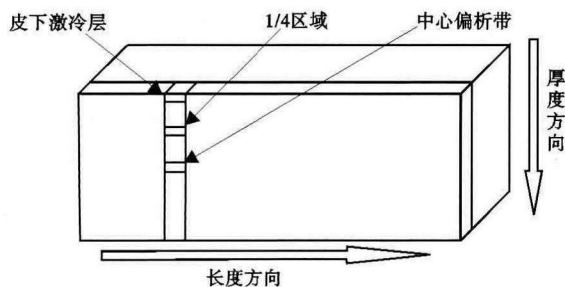


图1 铸坯试样加工示意图
Fig.1 Schematics of casting slab sampling

表2 结晶器保护渣的组成 / %
Table 2 Ingredient of mold flux / %

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	F	MgO	C
32~34	27~30	3~5	8.5~10.0	7.5~8.0	3.5~4.0	1.5~2.0

所示。结晶器保护渣的组成如表2。

共取某一浇次6炉各10组坯样,通过对铸坯皮下激冷层、中心线偏析带和1/4区域进行碳含量检测,检测结果取平均值如图2所示。

图2(a)中可以看出,第1、2、3炉皮下激冷层碳含量明显低于对应炉次的1/4区域和中心偏析带,碳含量最低,偏析严重。第4、5炉碳含量稳定,无明显表面增碳和中心偏析。而第6炉皮下激冷层碳含量明显高于对应炉次的1/4区域和中心偏析带,表面增碳最为严重。图2(b)中可以看出,同一浇次第1炉,随着浇铸的进行,铸坯碳含量在3 m之前是一直在减少的,3 m以后保持稳定。头坯开浇阶段碳含量明显高于后期,后期碳含量波动属于正常范围。

在超低碳钢连铸生产过程中,保护渣中的碳质材料向铸坯表面渗透,使铸坯表面碳含量升高^[8]。厚度为0.3~3.0 mm,碳含量约为保护渣原始配碳量1.5~5.0倍的富集碳层靠近钢水弯月面,易于与钢液接触是造成铸坯增碳的主要方式。在连铸生产中,一个浇铸周期的开始阶段即第1炉的开浇阶段,中间包和结晶器钢水液位不稳、拉速变

化较大,容易导致保护渣卷入坯壳以及二次氧化等原因使头坯洁净度变差,当然也包括铸坯增碳。铸坯不同位置上增碳的影响因素及结论如表3所示。

1.2 RH 终点碳和中间包碳含量差异

中间包覆盖剂成分见表4。

选取钢厂超低碳MA钢某一浇次的6炉钢,采用提样取样器取样RH终点、中间包样10组,检测碳含量并取平均值,如图3(a)所示,从图3(a)可以看出,RH精炼结束到中间包,第1炉的增碳量为最高达到 6×10^{-6} ,后面几炉的增碳量较小。RH精炼结束到中间包增碳的影响因素及结论如表5所示。

1.3 中间包样和坯样碳含量差异

从图3(b)可见,中间包到铸坯,第1炉增碳达到 8×10^{-6} 。第2、3、4、5、6炉增碳正常。

连铸过程中含碳物的来源主要有:

(1)结晶器保护渣的碳;(2)浸入式水口和塞棒含碳的水口和塞棒被侵蚀后,可形成含碳块状物,粘

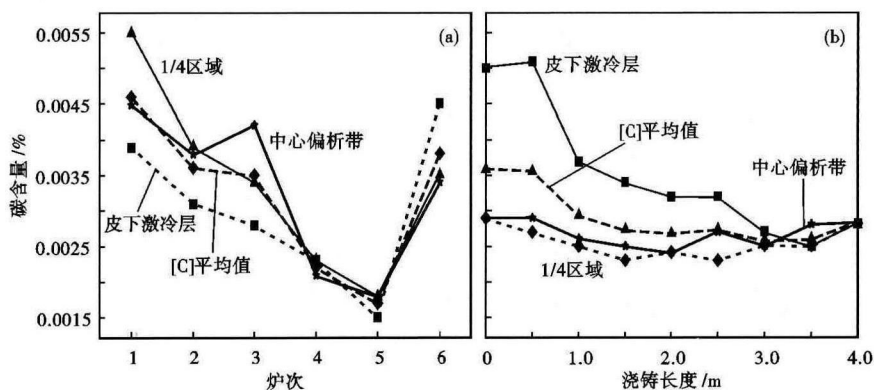


图2 MA钢铸坯厚度方向(a)和长度方向(b)的碳含量 / %
Fig.2 Carbon content in MA steel casting slab along thickness (a) and longitudinal direction (b) / %

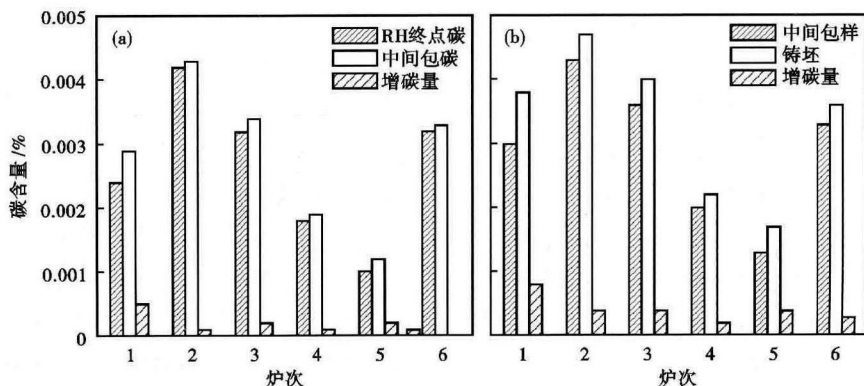


图3 RH终点与中间包样(a)和中间包钢液与铸坯(b)的碳含量差异 / %
Fig.3 Comparison between carbon content in RH end and tundish liquid (a), and in tundish liquid and casting slab (b) / %

表 3 铸坯不同位置上增碳的影响因素分析

Table 3 Analysis of effect factors on incremental carbon content in casting slab at different location

特点	位置	增碳因素分析	结论
工艺因素及操作	不同炉次厚度方向上	首炉开浇,操作不稳定,钢液面波动大,造成保护渣卷入,而卷入的保护渣没有来得及上浮,对 1/4 区域和中心偏析带增碳较皮下激冷层增碳明显,而后钢液面逐渐稳定,增碳量减少,后期保护渣上浮,皮下激冷层较 1/4 区域和中心偏析带增碳明显。	操作不稳定是不同炉次间第 1 炉增碳量最大的主要因素;结晶器开浇保护渣由于含发热剂导致头坯增碳可能为最主要的原因。
	同一浇次长度方向上	首炉头坯碳含量显著高于同浇次其他铸坯试样的碳含量的主要原因包括: (1)第 1 炉的开浇阶段,中间包液位未达到正常浇注液位,中间包内钢液冲击搅动较大,导致中间包覆盖剂的卷入,造成钢液增碳; (2)中间包内来不及上浮的覆盖剂随钢液进入结晶器,结晶器内钢液面波动较大,导致保护渣卷入,造成钢液增碳; (3)未及时上浮的部分渣料有可能通过连铸直接进入铸坯,造成铸坯增碳; (4)含碳质耐火材料导致钢液增碳,这个阶段保护渣内还没有来得及生成富集碳层。	

表 4 中间包覆盖剂的化学成分 / %

Table 4 Ingredient of tundish shielding agent / %

CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	C	Fe ₂ O ₃	H ₂ O
≥40	≥10	≤30	≤10	≤0.05	≤5	≤1.0

结在坯壳上;(3)粘附在塞棒上和浸入式水口内的含碳聚集物当塞棒内氩气压力超过一定值时,这些聚集物会被钢水冲走,与结晶器中钢水接触。

其中(2)、(3)可通过改善水口、塞棒的材质及连铸工艺使之得到改善,从中间包到铸坯,同一浇次首炉增碳是最严重的,增碳的主要来源是覆盖剂和保护渣。

1.4 中间包和结晶器增碳量差异

由图 4 可以明显看出,结晶器增碳量明显高于中间包增碳量,避免保护渣污染钢液是超低碳钢成功操作的关键因素^[9],结晶器保护渣相较于中间包覆盖剂对于钢液有更强的增碳作用,结晶器保护渣是超低碳钢增碳最主要的因素。比较表 2、表 3 可以看出保护渣的原始配碳量高于覆盖剂。

2 钢包低碳原辅材料的侵蚀和碳含量的变化

2.1 钢包壁砖侵蚀状况及碳含量调查

由表 6 可以看出,B 型号钢包壁砖的接触部分和非接触部分的碳含量变化平均值为 0.136%,A 型号钢包壁砖的接触部分和非接触部分的碳含量变化平均值为 0.068%,前者明显高于后者。未使用的 B 型号钢包壁砖碳含量为 0.182%,未使用的 A 型号钢包壁砖碳含量为 0.114%,由以上分析可以得出,钢包壁砖中初始碳含量越高,向钢液中的渗入碳的几率越大,渗碳越多。

2.2 钢包底部浇注料

调查钢包底部浇注料(其碳含量为 0.054% ~ 0.056%)对钢液增碳的影响,发现其影响不大。

2.3 浇注的长水口

现场取已经用过的长水口残片,分别测长水口内部与钢液接触部分和外侧非接触部分的碳含量(表 7)。由表 7 可以看出,长水口碳含量变化很大,因此当水口内壁受到钢液冲刷时,长水口中的碳渗

表 5 RH 精炼结束到中间包的增碳影响因素的分析

Table 5 Analysis of effect factors on incremental carbon content in liquid from RH end to tundish

特点	位置	增碳因素分析	结论
工艺因素及操作	RH 精炼结束到中间包	(1)覆盖剂的大量消耗,基本都进入钢水中,开浇首炉覆盖剂消耗量 150 ~ 250 kg,造成首炉钢水增碳严重; (2)操作过程,中间包液面过低未能达到工艺要求,增大了卷渣的可能性。生产调度等原因造成连铸钢水跟不上,导致中间包液面过低,增加了覆盖剂漩涡卷入钢液的可能性,造成增碳; (3)钢液温度波动,增加覆盖剂卷入的可能性。换包时,当钢包放空,钢包进入中间包钢水温度低,下一包开浇,钢水温度迅速升高,中间包内钢水上下形成温度差,形成对流,对中间包液面造成波动; (4)换包开浇时,钢水对中间包液面冲击比较大,造成液面波动大,也增大了覆盖剂卷入的可能性。波动现象可以通过结晶器液面波动来验证; (5)后面几炉,操作、钢液面等逐渐稳定,增碳量较小。	覆盖剂中的碳是引起中间包钢水增碳和渗碳的根本原因。

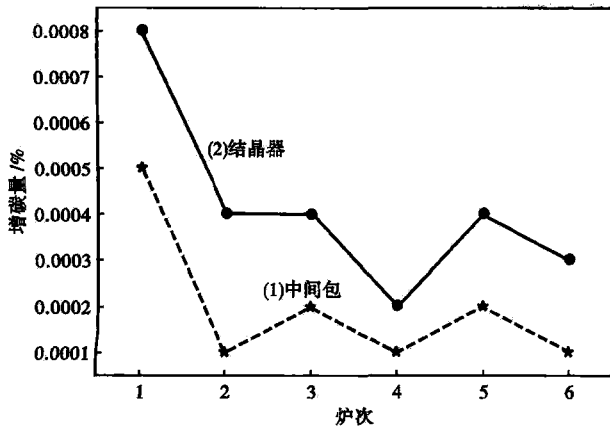


图4 中间包(1)和结晶器钢液(2)的增碳量/%

Fig.4 Incremental carbon content in tundish liquid (1) and mold liquid (2) / %

表6 A型号钢和B型号钢包壁砖与钢液接触部分和非接触部分的碳含量/%

Table 6 Carbon content in ladle brick A-type and B-type bring into non-contact and contact with steel liquid / %

钢包	试样号	钢包壁砖		碳含量变化
		非接触部分	接触部分	
A型号	1	0.13	0.04	0.09
	2	0.10	0.06	0.04
	3	0.11	0.05	0.06
	4	0.10	0.03	0.07
	5	0.13	0.05	0.08
	平均值	0.114	0.046	0.068
B型号	1	0.17	0.04	0.13
	2	0.20	0.06	0.14
	3	0.18	0.05	0.13
	4	0.18	0.03	0.15
	5	0.18	0.05	0.13
	平均值	0.182	0.046	0.136

表7 长水口与钢液接触部分和非接触部分的碳含量/%

Table 7 Carbon content in long nozzle refractory bring into contact and non-contact with steel liquid / %

试样号	与钢液接触部分	与钢液非接触部分
1	2.13	23.52
2	2.10	23.15
3	2.15	23.87
4	2.13	22.92
5	2.06	23.44

入到钢液中。由于长水口的配碳量为23%左右,碳含量比例很大,所以碳的渗入量很大。但耐火材料的增碳影响远小于保护渣和覆盖剂。

3 措施及效果

采取控制措施为:(1)稳定操作,保持稳定的保护渣品种、添加频率确保熔渣层厚度的稳定,确保保护渣熔化速率;减少冶金设备振动造成的钢液波动,造成碳质渣料的卷入而增碳;减少钢液对耐火材料

的冲刷。(2)选择相关原辅料(保护渣、覆盖剂、耐火材料)的初始碳含量小的品种,通常,将保护渣原始配碳量控制在1%~2%,覆盖剂中的自由碳含量不能小于1.0%。(3)向保护渣中添加 MnO_2 等氧化剂^[10],在保护渣中碳含量相等的情况下,含 MnO_2 的保护渣与不含 MnO_2 相比,钢水增碳量减少了30%~50%。

通过采取以上措施,钢厂超低碳钢钢液精炼结束-中间包增碳 $\leq 3 \times 10^{-6}$ 比例由73%左右提高到大于75%,产品质量得到较大提高。

4 结论

(1)用量大使用频率大、碳含量高的保护渣、覆盖剂对钢液增碳影响远大于使用炉次多,结构较致密的耐火材料。

(2)保护渣由于远高于原始配碳量的富集碳层的存在,且易于与钢液接触,其对钢液增碳影响大于覆盖剂,因此,要着重考虑保护渣对于钢液的增碳。

(3)减少相关原辅料(保护渣、覆盖剂、耐火材料)的原始配碳量,同时在保护渣中添加一定量 MnO_2 等氧化剂,可以明显减少钢液增碳。

(4)原辅料和操作工艺等多种因素共同影响超低碳钢增碳。

参考文献

- [1] 张文,姚伟智,张洪峰,等. 鞍钢1700ASP中薄板坯连铸生产超低碳钢水增碳分析[C]. //第七届中国钢铁年会论文集, 2009;1029-1032.
- [2] 曾建华,陈小平,赵启成,等. 国内外超低碳钢连铸结晶器保护渣的设计与应用[J]. 钢铁钒钛, 2000, 21(1): 40-44.
- [3] Bommaraju R. Optimum Selection and Application of Mold Fluxes for Carbon Steels. ISS. Steelmaking Conference Proceedings. Washing: ISS. 1991, 74; 131-146.
- [4] Nakato H, Takeuchi S, Fujii T, et al. Characteristics of New Mold Fluxes for Strand Casting of Low and Ultra Low Carbon Steel Slabs. ISS. Steelmaking Conference Proceedings. Washing: ISS. 1991, 74: 639-646.
- [5] 徐永斌,徐兵. 新型钢包覆盖剂的研制[J]. 炼钢, 2006, 22(5): 31-33, 36.
- [6] 万恩同,王俊杰,杨运超,等. 连铸中间包覆盖剂现状及发展趋势[J]. 武钢技术, 2007, 45(4): 48-50.
- [7] 阮国智,李楠,吴新杰,等. Al_2O_3-C 耐火材料对超低碳钢的增碳作用[J]. 耐火材料, 2004, 38(6): 399-401, 406.
- [8] 姜茂发,刘承军,王云盛,等. 超低碳钢连铸保护渣的发展[J]. 炼钢, 2000, 16(3): 52-55, 60.
- [9] 林功文,吴杰,李正邦,等. 超低碳钢连铸结晶器用保护渣研究现状[J]. 钢铁, 1999(2): 67-69.
- [10] Terada S, Kaneko S. Development of Mold Fluxes for Ultra Low Carbon Steel[J]. Iron & Steel Maker, 1991, 18(9): 41-44.

邓力(1989-),男,硕士研究生,从事钢种研发成套技术、铸坯与轧材质量缺陷控制与解决方案等方面的研究。

E-mail: deli11209@163.com

收稿日期: 2014-10-20