



RH 精炼炉脱碳模式对 IF 钢洁净度的影响

薛 瑞¹, 陈永洪¹, 刘 彬¹, 汤海明¹, 闫龙阁², 姚瑞凤¹

(1 河北钢铁集团邯钢分公司邯宝炼钢厂, 邯郸 056004; 2 河北钢铁集团邯钢分公司技术中心, 邯郸 056004)

摘 要: 为了提高 IF 钢的洁净度及可浇性, 结合邯钢公司邯宝炼钢厂 260 t RH 真空炉生产实际, 以 16 炉 H-OLTB 转炉工艺试验为样本, 通过取样、夹杂物扫描电镜和数据分析等手段, 对冶炼 IF 钢时自由脱碳模式和强制脱碳模式的终点碳含量、脱碳时间、顶渣、夹杂物数量和尺寸进行了研究, 以 RH 精炼结束时顶渣 T. Fe 和 T[O] 的质量分数以及夹杂物数量和尺寸为依据, 统计分析不同脱碳模式对顶渣氧化性和钢水洁净度的影响。研究表明, 自由脱碳模式在脱碳时间和终点碳含量方面优于强制脱碳模式, 自由脱碳模式平均缩短脱碳时间约 3.15 min; 强制脱碳模式顶渣 T. Fe 和 FeO 质量分数均低于自由脱碳模式, 强制脱碳模式 $w[\text{T. Fe}]$ 、 $w[\text{FeO}]$ 分别为 5.68%、5.45%, 自由脱碳模式 $w[\text{T. Fe}]$ 、 $w[\text{FeO}]$ 分别为 7.26%、6.84%; 强制脱碳模式下的 IF 钢水夹杂物数量更少, 自由脱碳模式和强制脱碳模式单位面积内尺寸在 15 μm 以下的夹杂物数量分别为 16.2~23.4 个和 10.6~14.4 个。综合来看, 建议 H-OLTB 转炉将 RH 炉进站初始氧含量控制在 $(286\sim 408)\times 10^{-6}$, RH 精炼炉冶炼 IF 钢采用强制脱碳模式, 钢水洁净度更高。

关键词: IF 钢; 自由脱碳; 强制脱碳; 夹杂物

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2025-00136 **中图分类号:** TF769.4

Influence of the Decarburization Mode of the RH Refining Furnace on the Cleanliness of IF Steel

Xue Rui¹, Chen Yonghong¹, Liu Bin¹, Tang Haiming¹, Yan Longge², Yao Ruifeng¹

(1 Hanbao Steelmaking Plant, HBIS Handan Iron and Steel Group Co., Ltd., Hadan056004, China;

2 The Technology Center of HBIS Handan Iron and Steel Group Co., Ltd., Hadan056004, China)

Abstract: To improve the cleanliness and castability of IF steel, this study was conducted by 260 t RH vacuum furnace facility at Hanbao Steelmaking Plant, HBIS Handan Iron and Steel Group Co., Ltd. Using 16-heats H-OLTB converter process as a case study, researchers employed sampling techniques, inclusions scanning electron microscopy (SEM), and data analysis to evaluate endpoint carbon content, decarburization duration, top slag, and inclusion quantity/size under both free-decarburization and forced-decarburization modes during IF steelmaking. Statistical analyses were performed based on the mass fractions of top slag TFe and TO at RH refining completion, along with inclusion quantity and size metrics. The findings systematically demonstrate how decarburization modes influence top slag oxidation characteristics and molten steel purity. The results show that the free decarburization mode outperforms the forced decarburization mode in terms of decarburization time and end-point carbon content, with the free decarburization mode reducing decarburization time by an average of approximately 3.15 minutes. The mass fractions of T. Fe and FeO in the top slag under the forced decarburization mode are lower than those under the free mode, with values of 5.68% and 5.45% respectively for the forced mode, compared to average values of 7.26% and 6.84% for the free mode. The number of inclusions in IF molten steel is fewer under the forced decarburization mode, with the number of inclusions ≤ 15 microns per unit area ranging from 16.2 to 23.4 for the free mode and 10.6 to 14.4 for the forced mode. Overall, in the H-OLTB converter, the initial oxygen content at the inlet of the RH furnace is controlled at $(286\sim 408)\times 10^{-6}$. When refining IF steel in the RH furnace using the forced decarburization mode, the molten steel has higher cleanliness.

Key Words: IF Steel; Free Decarburization; Forced Decarburization; Cleanliness; Inclusions

IF 钢具有良好的深冲性, 广泛应用于汽车和家电行业, 由于客户对板材表面质量和洁净度的要求逐渐提高, 这就需要对钢水夹杂物数量的控制更加严格。IF 钢中夹杂物的来源主要是铝脱氧产生的高熔点 Al_2O_3 夹杂, 这类夹杂物尺寸小, 数量多, 容易

在浇铸过程中发生水口结瘤, 影响连铸的可浇性^[1-4]。冶炼 IF 钢的核心工作是降低钢中的自由氧含量以及对顶渣进行优化和改制, 从而减少钢水氧化物夹杂的生成^[5-8]。

为了提高 IF 钢的洁净度, 众多学者进行了深入

研究。胡巍等^[9]通过优化精炼渣改质剂,将RH炉进站精炼渣中T.Fe控制在7.13%,出站精炼渣FeO含量控制在5.52%,热轧时废次降比率降低了20.2%。贾刘兵等^[10]通过增加铝钛加入间隔时间、降低脱碳结束氧以及钢包顶渣改质,提高了高锰IF钢的洁净度。王宝等^[11]认为精炼渣中 $w[\text{SiO}_2]$ 控制在6%~8%, $w[\text{MgO}]$ 控制在6%, $w[\text{T.Fe}]$ 控制在5%~10%,钙铝比控制在1.4~1.6时,精炼渣对 Al_2O_3 夹杂有较好的吸附性。陈利等^[12]通过转炉底吹工艺优化、终点碳氧含量控制、顶渣改质、真空高效深脱碳技术和连铸保护浇铸工艺试验研究,提高了IF钢的洁净度和可浇性。但鲜有文献研究IF钢的脱碳时间,缩短IF钢脱碳时间可以减少钢水温降,降低温度补偿,从而减少 Al_2O_3 夹杂物,有利于钢水洁净度。

为了提高IF钢的洁净度及化学成分达标,通过大批量取样、夹杂物扫描电镜和数据分析等手段,对不同脱碳模式下IF钢终点碳含量、脱碳时间、顶渣氧化性、夹杂物数量和尺寸进行了研究,为进一步优化IF钢的生产工艺提供了理论指导和实践依据。

1 生产流程及试验方法

1.1 生产流程

IF钢主要化学成分见表1。生产流程为:倒灌站→铁水预脱硫→H-OLTB转炉→RH真空精炼炉→板坯连铸机。

转炉终点温度控制在1660~1700℃,禁止转炉二次补吹,炉口保持正压力,防止吸入空气,出钢过程加入600kg铝渣进行预脱氧,同时,加入石灰500~600kg,顶渣厚度控制在100mm以内,降低氧势的同时,也要降低渣中FeO含量^[13]。精炼渣中钙铝比(Ca/Al)的比例会影响精炼渣的FeO活性和对夹杂物的吸收能力,Ca/Al比为1.2~1.5有利于IF钢的精炼^[14-15]。转炉出钢使顶渣Ca/Al比在1.2~1.5。

RH炉进行真空循环处理,脱碳时间小于16min,根据脱碳终点氧含量加入铝脱氧剂脱氧,深脱氧循环3min后加入钛铁合金,保持循环8min以上,真空度要求小于120Pa,出钢温度控制在1595~1605℃。连铸中间包过热度控制在25~35℃之间,拉速控制在1.2~1.3m/min进行稳态浇铸,工业实验共计16炉。

1.2 试验方法

钢包到达RH精炼炉工位时,采用超低碳钢取样器取钢水试样,用来检测钢水碳含量,采用定氧

表1 IF钢主要化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Al	N	Ti
≤0.002	≤0.01	0.06~0.12	≤0.012	≤0.01	0.02~0.05	≤0.030	0.06~0.07

探头检测钢水氧含量,当钢水初始氧含量超过完成脱碳任务所需消耗的氧量时,采用自然脱碳工艺,不需要额外的吹氧操作,反之,则采用强制吹氧脱碳工艺,通过氧枪在真空室内吹氧,补偿钢中氧含量,以加速脱碳反应。

实验取转炉出钢结束后、RH炉进站、脱碳结束时、加铝脱氧后、加钛合金化后及出站炉渣试样,RH进站、出站取钢水试样,RH出站前取提桶样。炉渣试样成分采取ICP-AES分析仪检测。钢液中[O]含量采取氧传感器在线检测,钢样采用Leco氧氮分析仪分析钢中T[O]和[N]质量分数。通过ASPEX自动扫描电子显微镜检测钢中夹杂物成分与数量。以两种脱碳工艺的RH精炼结束时顶渣T.Fe和T[O]的质量分数为依据,统计分析不同脱碳模式对顶渣氧化性的影响,以夹杂物数量和尺寸为依据,统计分析不同脱碳模式对钢水洁净度的影响。

2 实验结果分析

2.1 不同脱碳模式对终点碳含量及脱碳时间的影响

H-OLTB底吹喷粉转炉工艺较于传统转炉在碳氧积控制方面具有明显优势。较于传统顶底复吹转炉,相同的钢水碳含量,H-OLTB工艺能使钢水氧含量更低,相同的钢水氧含量,H-OLTB工艺能使钢水碳含量更低,这对RH的冶炼有明显的积极作用,一方面可以缩短精炼时间,减少温度补偿,从而减少升温产生的 Al_2O_3 夹杂,另一方面降低了转炉终点氧含量,使顶渣氧化性减弱,降低FeO和MnO含量,对钢水洁净度有很大的提升。

为了探索自由脱碳工艺对碳含量的影响,选取了8炉钢数据作对比。图1为自由脱碳工序下初始氧、初始碳、结束氧、结束碳及脱碳时间数值。由图1可知,8炉钢的初始氧含量在 $(450\sim532)\times 10^{-6}$ 之间,初始碳含量在 $(215\sim276)\times 10^{-6}$ 之间,脱碳结束氧在 $(208\sim320)\times 10^{-6}$ 之间,结束碳在 $(9\sim16)\times 10^{-6}$ 之间。可见,正常工况下自由脱碳工序可使碳含量降至 17×10^{-6} 以下,满足成分要求。其中炉次5和8脱碳结束氧分别为 208×10^{-6} 和 214×10^{-6} ,结束碳含量分别

为 16×10^{-6} 和 17×10^{-6} ,碳含量在要求范围内上限,应适当提高脱碳结束氧或延长脱碳时间。炉次1和4脱碳结束氧分别为 320×10^{-6} 和 305×10^{-6} ,结束碳含量 8×10^{-6} 和 9×10^{-6} ,初始氧高,钢中自由氧过盛,真空室压降快,脱碳迅速。

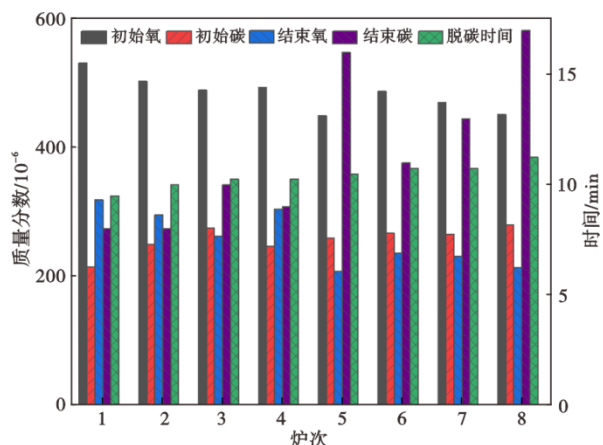


图1 自由脱碳工序下初始氧、初始碳、结束氧、结束碳及脱碳时间数值

Fig. 1 Numerical values of initial oxygen, initial carbon, final oxygen, final carbon and decarburization time under the free decarburization process

为了探索强制脱碳吹氧工艺对碳含量的影响,选取了8炉钢数据作对比。图2为强制吹氧脱碳工序下初始氧、初始碳、结束氧、结束碳及吹氧量数值。由图可知,8炉钢的初始氧含量在 $(230 \sim 408) \times 10^{-6}$ 之间,初始碳含量在 $(273 \sim 512) \times 10^{-6}$ 之间,脱碳结束氧在 $(274 \sim 327) \times 10^{-6}$ 之间,结束碳在 $(9 \sim 16) \times 10^{-6}$ 之间。其中炉次7和8初始氧含量为 230×10^{-6} 和 279×10^{-6} ,脱碳结束氧分别为 322×10^{-6} 和 318×10^{-6} ,结束碳含量均为 16×10^{-6} ,吹氧量分别为 530×10^{-6} 和 450×10^{-6} ,吹氧量较高,碳含量在要求范围内上限,这是由于过量地吹脱碳氧使真空室内压降速率变慢,使真空室内达到深真空时间延长,错过了脱碳“黄金时期”,应适当提高初始氧含量,防止碳含量超标。炉次6初始氧含量为 286×10^{-6} ,脱碳结束氧为 327×10^{-6} ,结束碳含量均为 14×10^{-6} ,碳含量达标。为了保证IF钢的碳含量达到标准,RH初始氧含量应大于 286×10^{-6} 。

对比图1和图2可知,自由脱碳模式下平均脱碳时间为10.41 min,强制脱碳模式下平均脱碳时间为13.56 min,自由脱碳模式下脱碳时间短,这是因为强制脱碳增加了吹脱碳氧的时间,且脱碳结束氧相对较低,适当地延长了脱碳时间。可见,自由脱碳模式在脱碳速率方面优于强制脱碳模式。

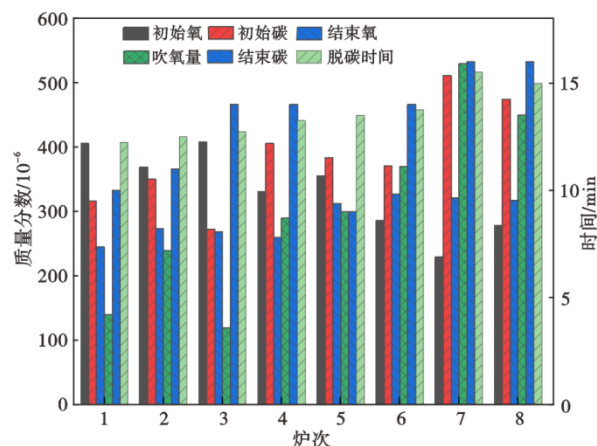


图2 强制吹氧脱碳工序下初始氧、初始碳、结束氧、结束碳及吹氧量数值

Fig. 2 Numerical values of initial oxygen content, initial carbon content, final oxygen content, final carbon content and the amount of oxygen blown in the forced oxygen-blowing decarburization process

在正常工况下,自由脱碳和强制脱碳都能在脱碳结束时将碳含量降低至 17×10^{-6} 以下,自由脱碳模式能将碳含量降得更低,这是由于自然脱碳初始氧较高,有利于脱碳反应正向进行,如式(1),由于初始氧较高,顶渣FeO和MnO含量增加,深脱氧后顶渣中的FeO和MnO被还原,不断地向钢液扩散,形成小颗粒 Al_2O_3 夹杂物,同时,也有概率使脱碳结束氧偏高,这也会增加 Al_2O_3 夹杂物数量,从而恶化钢水洁净度,不利于连铸可浇性。对转炉工序而言,自由脱碳工艺对初始氧的控制难度较大,可适当降低初始氧含量。强制脱碳有利于精准控制脱碳结束氧^[16],降低脱碳结束氧可减少 Al_2O_3 夹杂,提高钢水洁净度,但初始氧含量也不宜过低,过高的脱碳氧量会延长脱碳时间,不利于匹配生产节奏,同时需要更多的温度补偿,增加 Al_2O_3 夹杂物,恶化钢水洁净度。



2.2 不同脱碳模式对顶渣的影响

图3为IF钢自由脱碳模式下冶炼过程炉渣试样各化学成分含量平均值。由图3可知,转炉出钢后渣中 $w[FeO]$ 均值为11.40%, $w[MnO]$ 为2.93%,渣中氧化性较强,加入铝渣后,在RH炉进站时,经过反应,FeO和MnO被铝渣还原, $w[FeO]$ 由11.40%降至7.41%, $w[MnO]$ 由2.93%降至2.81%。随着脱碳反应的进行,钢中自由氧含量不断减少,渣中 $[O]$ 缓慢向钢液扩散。加铝深脱氧后,钢中氧含量急剧降低,产生大量 Al_2O_3 ,渣中有部分FeO和MnO被分解,被分解的自由氧向钢液中转移,被钢液中铝还原后

产生 Al_2O_3 。所以,渣中 FeO 和 MnO 含量减少, Al_2O_3 含量增加。王睿等^[12]发现, RH 精炼处理后, IF 钢中 $T[\text{O}]$ 含量与炉渣中的 FeO 含量呈线性关系, 控制精炼渣中 TFe 质量分数在 7% 以下, 可有效地控制钢液中铝氧夹杂的形成。自由脱碳模式下 RH 炉出站前顶渣 TFe 含量较高, 平均在 7.26%, 难以有效控制 Al_2O_3 夹杂的生成。袁保辉等^[17]研究认为, $w[\text{FeO}]$ 为 6% 以下有利于 IF 钢的精炼, 自由脱碳模式下 RH 炉出站前顶渣 $w[\text{FeO}]$ 较高, 平均在 6.84%, 钢水洁净度较差。

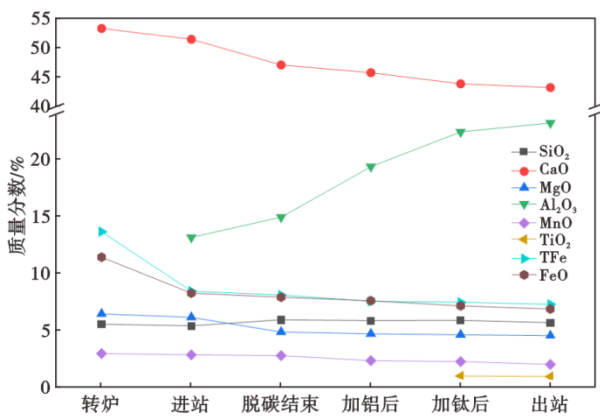


图 3 IF 钢自由脱碳模式下冶炼过程炉渣试样各化学成分含量平均值/%

Fig. 3 Average content of each chemical component in the slag samples during the smelting process under the free decarburization mode of IF steel/%

图 4 为 IF 钢强制脱碳模式下冶炼过程炉渣试样各化学成分含量平均值。由图 4 可知, 转炉出钢后渣中 $w[\text{FeO}]$ 均值为 10.11%, $w[\text{MnO}]$ 为 1.89%, 氧化性相对较低, 加入铝渣后, 在 RH 炉进站时, 经过反应, FeO 和 MnO 被铝渣还原, $w[\text{FeO}]$ 由 10.11% 降至 5.92%, $w[\text{MnO}]$ 由 1.89% 降至 1.81%, 随着强制吹氧脱碳, 部分钢水被氧化, $w[\text{FeO}]$ 和 $w[\text{MnO}]$ 轻微增加, 分别增加至 6.17% 和 1.86%, 其他氧化物含量变化不大。强制脱碳模式下 $w[\text{TFe}]$ 较低, 平均在 5.68%, 低于 7%^[12], 顶渣能有效控制 Al_2O_3 夹杂的生成。强制脱碳模式下 RH 炉出站前顶渣 $w[\text{FeO}]$ 平均在 5.45%, 低于自由脱碳模式 FeO 含量, 钢水洁净度提升明显。

要降低钢中含铝钛类氧化物夹杂, 就要减少钢液的铝损和钛损, 控制钢液中自由氧、渣中 FeO 和 MnO 含量^[17]。对比图 3 和图 4 可知, 强制脱碳模式 FeO 和 MnO 含量较自由脱碳模式低, 这是由于强制

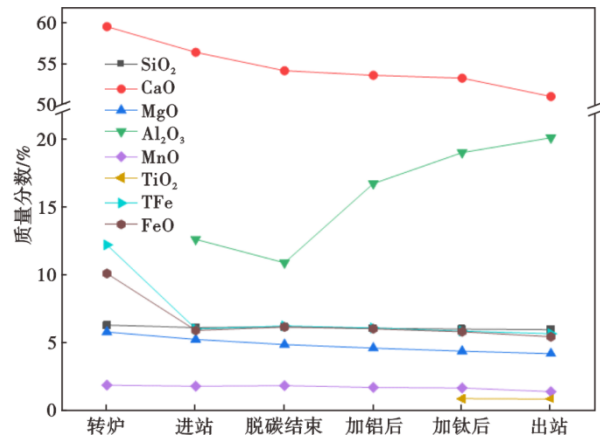


图 4 IF 钢强制脱碳模式下冶炼过程炉渣试样各化学成分含量平均值/%

Fig. 4 Average content of each chemical component in the slag samples during the smelting process under the forced decarburization mode of IF steel/%

脱碳模式进站初始氧含量较自由脱碳模式低, 钢水和顶渣氧化性较弱, 加铝深脱氧后, 渣中氧向钢水扩散相对较少, 避免了生成小尺寸 Al_2O_3 夹杂物, 有利于钢水洁净度。

2.3 不同脱碳模式对夹杂物的影响

王宝等^[11]认为, RH 精炼结束后, 钢中夹杂物基本上是 Al_2O_3 以及少量的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_x$ 。图 5 为自由脱碳模式下 RH 炉出站前夹杂物尺寸及数量, 由图 5 可知, 自由脱碳模式单位面积内尺寸在 $15\ \mu\text{m}$ 以下的夹杂物数量为 16.2~23.4 个/ mm^2 , 夹杂物在 <5 、 $5\sim 10$ 、 $>10\sim 15\ \mu\text{m}$ 的平均数量为 11.6、5.2、2.2 个/ mm^2 。图 6 为强制脱碳模式下 RH 炉出站前夹杂物尺寸及数量, 由图 6 可知, 强制脱碳模式单位面积内尺寸在 $15\ \mu\text{m}$ 以下的夹杂物数量在 10.6~14.4 个/ mm^2 之间, 夹杂物在 <5 、 $5\sim 10$ 、 $>10\sim 15\ \mu\text{m}$ 的平均数量为 8.5、3.2、0.8 个/ mm^2 。对比图 5 和图 6 可知, 两种脱碳模式产生的夹杂物尺寸小的数量多, 尺寸大的数量少, 自由脱碳模式产生夹杂物数量相比强制脱碳模式生夹杂物数量多, 其中 $5\ \mu\text{m}$ 以下的小尺寸夹杂物数量均大于 10 个/ mm^2 。自由脱碳模式下脱碳结束氧即使在 300×10^{-6} 以下, 夹杂物数量依然较多的原因是钢水初始氧含量高以及顶渣 FeO 和 MnO 含量高, 钢水深脱氧后产生大量 Al_2O_3 夹杂物, 同时顶渣中的 FeO 和 MnO 被还原, 不断地向钢液扩散, 形成小颗粒 Al_2O_3 夹杂物, 恶化了钢水的洁净度。

强制脱碳模式与自由脱碳模式相比, RH 进站钢中平均 $[\text{O}]$ 含量更低, 脱碳结束钢氧含量容易控制,

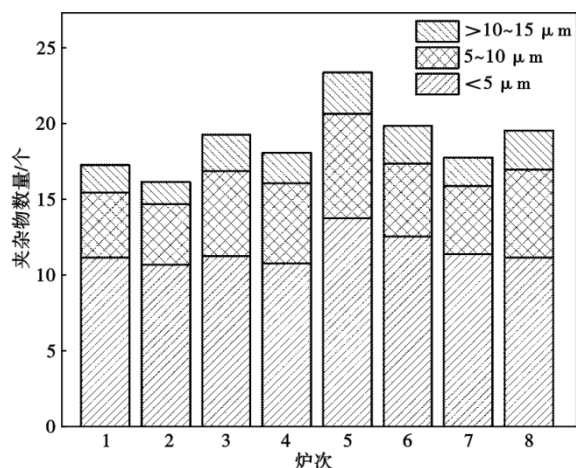


图5 自由脱碳模式下RH炉出站前夹杂物尺寸及数量

Fig. 5 Size and quantity of inclusions before the RH furnace tapping under the free decarburization mode

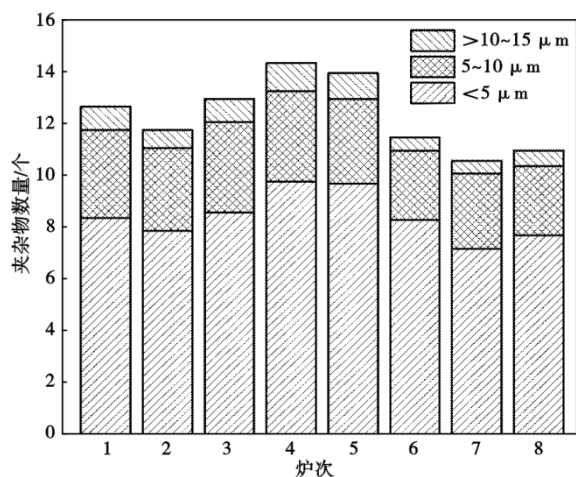


图6 强制脱碳模式下RH炉出站前夹杂物尺寸及数量

Fig. 6 Size and quantity of inclusions before the RH furnace tapping under the forced decarburization mode

在能满足RH脱碳效果的前提下,可适当提高转炉终点钢液碳含量、降低钢液氧含量,后续在RH精炼时采用强制吹氧脱碳工艺,适当增大吹氧量来弥补钢

中氧,可显著降低IF钢顶渣的氧化性,有利于钢水的洁净度。但钢水但初始氧含量也不宜过低,过高的脱碳氧量会延长脱碳时间,不利于匹配生产节奏,同时,需要更多的温度补偿,加铝吹氧升温反而恶化钢水洁净度,得不偿失。H-OLTB底吹喷粉转炉工艺较于传统转炉碳氧积更低,8炉强制脱碳模式初始氧含量最高的是 408×10^{-6} ,单位面积内尺寸在 $15 \mu\text{m}$ 以下的夹杂物数量在 $15 \text{个}/\text{mm}^2$ 以内,钢水洁净度较高,建议IF钢初始氧含量不高于 408×10^{-6} 。

通过大批量取样、夹杂物扫描电镜和数据分析等手段,对不同脱碳模式下IF钢终点碳含量、脱碳时间、顶渣氧化性、夹杂物数量和尺寸进行了研究。RH冶炼IF钢初始氧含量应大于 286×10^{-6} 以使钢水碳含量达标,初始氧含量应小于 408×10^{-6} 以提高钢水的洁净度,为进一步优化IF钢的生产工艺提供了理论指导和实践依据。

3 结论

1)自由脱碳模式相比强制脱碳模式脱碳时间更短,终点碳含量更低,冶炼周期更短。自由脱碳模式平均缩短脱碳时间约 3.15 min 。

2)强制脱碳模式顶渣T.Fe和FeO质量分数均低于自由脱碳模式,顶渣氧化性弱。强制脱碳模式 $w[\text{TFe}]$ 、 $w[\text{FeO}]$ 分别为 5.68% 、 5.45% ,自由脱碳模式 $w[\text{TFe}]$ 、 $w[\text{FeO}]$ 分别为 7.26% 、 6.84% 。

3)强制脱碳模式下的IF钢水夹杂物数量少,钢水洁净度高。自由脱碳模式和强制脱碳模式尺寸在 $15 \mu\text{m}$ 以下的夹杂物数量分别为 $16.2 \sim 23.4 \text{ 个}/\text{mm}^2$ 和 $10.6 \sim 14.4 \text{ 个}/\text{mm}^2$ 。

为了保证IF钢的洁净度,要降低初始氧含量和顶渣氧化性,但钢水初始氧含量过低会延长脱碳时间,增加温度补偿,恶化钢水洁净度,甚至可能导致IF钢水碳含量超标。综合来看,RH精炼炉冶炼IF钢时,H-OLTB转炉将RH进站初始 $w[\text{O}]$ 控制在 $(286 \sim 408) \times 10^{-6}$,采用强制脱碳模式,钢水洁净度更高。

参考文献

- [1] 蔡开科,孙彦辉,秦 哲. 浇注过程中间包水口堵塞现象[J]. 连铸, 2007, 32(6): 1-6.
- [2] 杨明磊,程常桂,李 阳,等. 连铸中间包水口堵塞机理及控制技术的发展[J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(10): 773-780.
- [3] Caley W F. On the cause and prevention of tundish nozzle clogging [J]. High Temperature Materials and Processes, 2006, 25(3): 157-166.
- [4] 王新华. 高品质冷轧薄板钢中非金属夹杂物控制技术[J]. 钢铁, 2013, 48(9): 1-7+15.
- [5] Li X, Wang L Z, Yang S F, et al. Effect of slag composition on the cleanliness of drill rod steel[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2019, 46(5): 416-423.
- [6] Ji Y Q, Liu C Y, Lu Y, et al. Effects of FeO and CaO/Al₂O₃ ratio in slag on the cleanliness of Al-killed steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49(6): 3127-3136.
- [7] 索金亮,王新华,李林平,等. 氧化性炉渣对IF钢洁净度的影响[J]. 炼钢, 2016, 32(6): 62-67+78.
- [8] 朱坦华,周秋月,任 英,等. 二次氧化过程IF钢中间包中夹杂物演变行为[J]. 钢铁, 2020, 55(3): 35-39+49.
- [9] 胡 巍,徐 斌,黄嘉琦,等. 260 t转炉-RH流程IF钢DC06顶渣

- 改质剂优化生产实践[J]. 特殊钢, 2021, 42(3): 27-30.
- [10] 贾刘兵, 罗衍昭, 董文亮, 等. 高锰高强IF钢转炉-连铸过程中夹杂物演变与控制[J]. 炼钢, 2023, 39(3): 73-78.
- [11] 王 宝, 李任春, 刘俊山, 等. DC06 IF钢精炼渣成分优化及钢渣中氧的控制[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(4): 293-301.
- [12] 陈 利, 杨 柳, 杜国利, 等. 超低碳IF钢氧化物夹杂控制工艺[J]. 炼钢, 2024, 40(6): 75-82.
- [13] Wang R, Bao Y P, Li Y H, et al. Effect of slag composition on steel cleanliness in interstitial-free steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2017, 24(6): 579-585.
- [14] Ji Y Q, Liu C Y, Yu H X, et al. Oxygen transfer phenomenon between slag and molten steel for production of IF steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2020, 27(4): 402-408.
- [15] Wang R, Li Y H, Li D Z, et al. Inclusions absorbed by slags in interstitial-free steel production[J]. Steel Research International, 2020, 91(2): 1900440.
- [16] 安 超, 李 辉, 张 普, 等. IF钢RH脱碳结束氧含量对钢液洁净度的影响[J]. 炼钢, 2023, 39(2): 24-27+55.
- [17] 袁保辉, 刘建华, 周海龙, 等. RH强制脱碳与自然脱碳工艺生产IF钢精炼效果分析[J]. 工程科学学报, 2021, 43(8): 1107-1115.