

无取向电工钢冶炼过程氧含量控制

郭飞虎^{1,2} 仇圣桃² 乔家龙² 刘磊²

(1 安徽工业大学冶金工程学院, 马鞍山 243002; 2 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081)

摘要 无取向硅钢的磁性能与钢的洁净度水平密切相关。为实现对无取向电工钢冶炼过程氧含量的合理控制, 分析了无取向电工钢冶炼过程碳氧含量变化数据, 热力学计算转炉终点临界碳含量与炉渣 a_{FeO} 。结果表明: 随着转炉终点碳含量的降低, 终点氧含量升高且波动范围大, 合理出钢碳含量应控制为 0.03% ~ 0.05%; 为满足炉渣中 T. Fe $\leq 24\%$ 的现场生产要求, 终点碳含量应高于 0.031%; 钢包底吹氩气可有效降低钢液中过剩氧, 降低钢液的平均碳氧积; 据现场生产数据, RH 精炼前理想碳、氧含量应控制为 0.025% ~ 0.035% 和 500×10^{-6} ~ 650×10^{-6} , 相应转炉终点碳含量控制为 0.03% ~ 0.04%。

关键词 无取向电工钢 转炉终点 RH 精炼 氧含量

Controlling Oxygen in Steelmaking Process of Non-Oriented Electrical Steel

Guo Feihu^{1,2}, Qiu Shengtao², Qiao Jialong² and Liu Lei²

(1 College of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002; 2 Engineering and Research Center for Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The magnetic properties of non-oriented electrical steels are closely related to the cleanliness level. In order to achieve reasonable control of oxygen in non-oriented electrical steel smelting process, the change of carbon and oxygen content were analyzed, the critical carbon content at the end-point of BOF and a_{FeO} in slag were also calculated. The results show that with the decrease of end-point carbon content, the end-point oxygen content increases and fluctuates widely. The ideal carbon content in tapping should be controlled at 0.03% ~ 0.05%. It is required that the content of T. Fe in slag should be $\leq 24\%$ and the end-point carbon content should be higher than 0.031%. Ladle bottom argon blowing can effectively reduce excess oxygen and decrease carbon-oxygen product in molten steel. According to production data, the ideal carbon and oxygen content should be controlled at 0.025% ~ 0.035% and 500×10^{-6} ~ 650×10^{-6} before RH refining, and the end-point carbon content of BOF should be controlled at 0.03% ~ 0.04%.

Material Index Non-oriented Electrical Steel, End-point of BOF, RH Refining, Oxygen Content

无取向硅钢是国民经济建设中电力、电子和军工等领域不可或缺的软磁合金。随着我国电能消耗和电工钢使用量的持续增长, 电工钢性能和质量的提升将会对节能减排和降低能耗产生重要影响。无取向电工钢与普通优质钢相比, 除含有较高的 Si、Al、Mn 合金元素及低的杂质元素外, 对钢中氧和夹杂物的要求极高^[1-2]。无取向电工钢通用的冶炼工艺: 铁水脱硫—转炉冶炼—RH 精炼—连铸。转炉吹炼终点氧含量控制对钢水的质量、炉衬的损耗和后工序的顺行都有重要影响; RH 精炼处理时, 钢液要有足够的氧在生产允许时间内将碳脱至目标值, 且保证脱碳终点氧含量控制在较低范围^[3-4]。因此, 研究无取向电工钢冶炼过程氧含量对冶炼节奏和钢液的洁净度的影响具有重要意义。目前阶段, 研究主要集中转炉冶炼和 RH 精炼单个工序的氧含量变化, 而无取向电工钢整个冶炼流程氧含量变化缺乏

系统深入研究^[4-6]。

本研究以钢厂无取向电工钢的冶炼为对象, 现场跟踪 120 t 转炉冶炼、钢包底吹氩气和 RH 精炼过程, 根据现场生产数据和理论计算, 系统分析了各冶炼工序钢液中氧含量的变化, 探究了无取向电工钢冶炼过程氧含量的合理控制, 以期为提高钢液洁净度提供理论依据。

1 转炉终点氧含量控制

1.1 理论碳氧积

脱碳反应是贯穿于无取向电工钢冶炼的一个主要反应, 转炉冶炼主要的任务之一就是将熔池中的碳脱至目标钢种要求。转炉吹炼过程中熔池中的碳氧反应主要为:

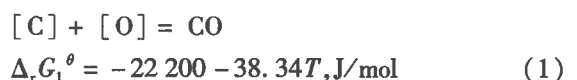


表1 无取向电工钢冶炼过程各工序工艺参数

Table 1 Process parameters of non-oriented electrical steel in steelmaking process

工序	主要工艺参数
BOF	装入量 120 t; 铁水比 > 90 t; 单渣法; 碱度 3.0 ~ 3.5; 终点温度: 1 680 ~ 1 720 °C; 出钢 [C] ≤ 0.06%
氩站	钢水温度: 1 630 ~ 1 660 °C; 出钢后钢包底吹氩气 3 min; 吹氩流量: 40 m ³ /h
RH 精炼	极限真空度 ≤ 100 Pa; 总脱碳时间 ≤ 20 min, 净循环时间: 6 ~ 8 min; 脱碳期环流气体流量: (110 ± 5) m ³ /h, 净循环环流气体流量: (80 ± 5) m ³ /h

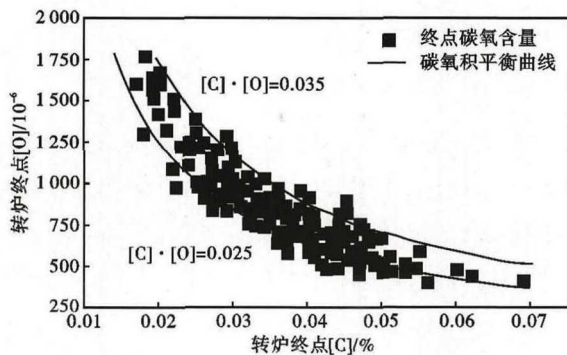


图1 转炉终点碳-氧关系

Fig. 1 Relationship between [C]-[O] at end-point of BOF

$$K_1 = \frac{P_{CO}}{a_{[C]} a_{[O]}} = \frac{P_{CO}}{f_c f_o [C][O]} \quad (2)$$

钢厂冶炼无取向电工钢过程各工序工艺参数如表1所示。分析转炉中碳氧关系,取 $P_{CO} = 1$; f_c 和 f_o 随着钢中碳含量变化呈相反的反方向变化, $f_c f_o$ 的乘积接近 1^[7], 经计算得相应的理论碳氧积为 0.002 5。实际生产电工钢时转炉终点碳氧分布情况如图1所示,由图1可以看出,该钢厂转炉终点实际碳氧积主要分布在 0.002 5 ~ 0.003 5。转炉吹炼的氧由熔渣向钢液层传递,向熔池底部扩散,熔池的实际氧含量高于与理论上与碳平衡的数值,实际碳氧积明显高于理论碳氧积,终点氧含量分布范围大。

1.2 终点碳氧含量分布

转炉终点碳氧含量是决定钢中内生夹杂物数量的重要因素,合理的转炉终点碳氧含量对后续的精炼有事半功倍的效果。分析转炉终点碳-氧含量的关系,确定合适的出钢碳含量范围,可保证合理的终点氧含量。对钢厂在同一吹炼条件下转炉终点碳氧含量进行统计分析(共 320 炉),将转炉终点碳含量划分五个范围,分别统计不同出钢碳含量范围内终点氧含量的分布,如图2所示。

由图2可知,随着转炉终点碳含量的降低,终点氧含量分布范围不断增加。这说明转炉出钢碳越低,终点氧含量波动范围也越大,终点氧含量越难控

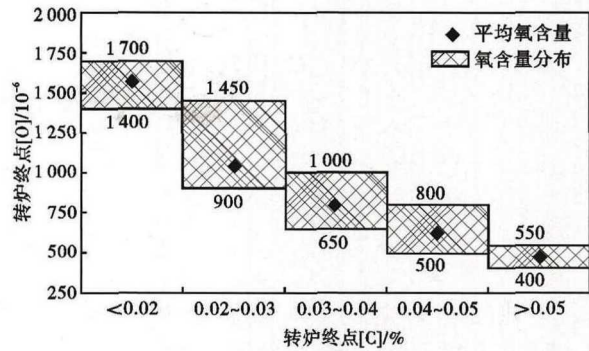


图2 转炉出钢碳含量范围对应的氧含量

Fig. 2 Oxygen content corresponding to carbon content range at BOF tapping

制。当转炉出钢碳含量小于 0.03%, 转炉终点平均氧含量高于 $1\ 000 \times 10^{-6}$, 将造成渣中 (FeO) 的升高,一方面降低转炉的冶金效果和经济效益,另一方面加剧炉衬的冲刷,降低炉衬使用寿命^[3]。当转炉终点碳含量大于 0.05%, 转炉终点平均氧含量为 481×10^{-6} , 钢中氧含量偏低,在 RH 精炼脱碳过程需要吹氧强制脱碳,强制脱碳对吹氧时机和吹氧量的要求较高,操作不当时不仅易损伤底部耐材,而且吹氧操作延缓的真空室压力的降低,影响脱碳效率^[5]。所以转炉终点碳含量应该控制在 0.03% ~ 0.05%, 此时钢液中氧含量分布在 $500 \times 10^{-6} \sim 1\ 000 \times 10^{-6}$ 。

2 转炉终点合理碳含量的确定

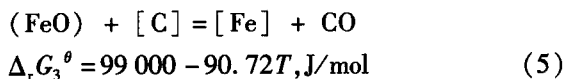
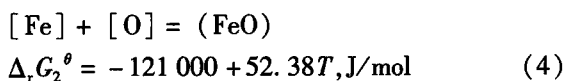
2.1 终点临界碳含量

转炉冶炼过程中根据单位时间内氧的消耗来确定脱碳速率的计算关系式(3)。

$$V_{O_2} \cdot dt = -\frac{16}{12} d\omega[C] + d\omega[O] + d\omega(O) \quad (3)$$

式中: V_{O_2} - 供氧速度; $d\omega[C]$ - 钢液中碳含量变化; $d\omega[O]$ - 钢液中氧含量变化; $d\omega(O)_{渣}$ - 渣中氧含量变化,由渣中 (FeO) 折算出; dt - 单位变化时间。

由(3)式可知,脱碳反应的进行伴随着钢中氧含量和渣中氧化铁含量的增加。随着熔池中脱碳反应的进行,钢液中碳含量降低至临界值,钢液中碳含量的传质变成限制环节,脱碳速率降低,而吹入的氧主要与钢液中铁反应,钢液中氧含量和顶渣氧化性升高。转炉终点碳含量主要受转炉渣中 (FeO) 成分和温度影响^[3]。因此需要在一定出钢温度范围内,保证转炉渣合理的氧化性,热力学分析转炉终点临界碳含量。转炉吹炼接近终点,熔池内氧化反应如下式:



$$K_3 = \frac{P_{\text{CO}}}{a_{\text{FeO}} a_{\text{C}}} = \frac{P_{\text{CO}}}{f_{\text{C}} [\text{C}] a_{\text{FeO}}} \quad (6)$$

上述反应(6)达到平衡时,炉渣中(FeO)与转炉终点碳含量的关系式为:

$$[\text{C}] = \frac{P_{\text{CO}}}{f_{\text{C}} a_{\text{FeO}}} \cdot e^{\frac{99\,000 - 90.72T}{RT}} \quad (7)$$

式中:[C]- 终点碳含量/%; T- 温度/K; P_{CO} 为炉内CO分压比,取 $P_{\text{CO}} = 1$; a_{FeO} - 炉渣中 FeO 的活度; f_{C} - 钢液中碳的活度系数。

根据钢液中各组分的活度相互作用系数^[7]和表2转炉出钢成分计算出 $f_{\text{C}} = 0.96$ 。转炉冶炼终点温度在 1 680 ~ 1 720 °C, 将 $f_{\text{C}} = 0.96$ 带入式(8), 可以得到在转炉终点温度范围内渣中 FeO 的活度与钢液中碳含量的关系,如图3所示。

由图3可以看出,临界碳含量主要受转炉渣的 a_{FeO} 和温度的影响。在转炉出钢温度范围内,温度越高,临界碳含量越低;随着转炉渣的 a_{FeO} 的增加,转炉临界碳含量迅速降低,但临界碳含量的减少趋势逐渐降低。这种现象产生的主要原因是渣中 a_{FeO} 增加,炉渣黏度减少,流动性变好,促进渣中 FeO 的传质和渣-金界面反应,有利于提高脱碳反应速率;

表 2 无取向电工钢转炉出钢成分/%

Table 2 Composition of non-oriented electrical steel at BOF tapping/%

C	Mn	P	S	O
0.034	0.1	0.028	0.003 6	0.078

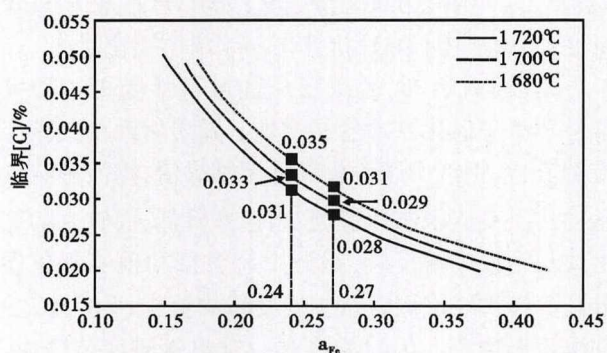


图 3 转炉钢液临界碳含量与渣中 a_{FeO} 的关系

Fig. 3 Relationship between a_{FeO} of slag and critical carbon in BOF liquid

但当碳含量的持续降低,碳在钢液的扩散成为脱碳反应的的限制环节,脱碳速度降低。

2.2 转炉合理出钢碳含量范围

生产实践中,常用渣中总的氧化亚铁含量 (ΣFeO) 来表示炉渣的氧化性。由于现场取的渣样会被空气二次氧化,渣中 Fe_2O_3 含量比实际情况高,但渣中 T. Fe 含量不变,一般钢厂倾向于用渣中 T. Fe 含量折算成 (ΣFeO) 来衡量转炉渣的氧化性。现以正规溶液模型来计算 FeO-MnO-SiO₂-MgO-CaO 为代表的转炉渣系中 FeO 的活度^[9]:

$$a_{\text{FeO}(\text{RS})} = \gamma_{\text{FeO}(\text{RS})} \chi_{\text{FeO}} \quad (8)$$

$$RT \ln \gamma_{\text{FeO}(\text{RS})} = 7\,110 \chi_{\text{MnO}}^2 - 41\,840 \chi_{\text{SiO}_2}^2 + 33\,470 \chi_{\text{MgO}}^2 - 31\,380 \chi_{\text{CaO}}^2 + 40\,580 \chi_{\text{MnO}} \chi_{\text{SiO}_2} - 21\,340 \chi_{\text{MnO}} \chi_{\text{MgO}} + 67\,780 \chi_{\text{MnO}} \chi_{\text{CaO}} + 58\,570 \chi_{\text{SiO}_2} \chi_{\text{MgO}} + 60\,670 \chi_{\text{SiO}_2} \chi_{\text{MgO}} + 102\,540 \chi_{\text{MgO}} \chi_{\text{CaO}} \quad (9)$$

$$a_{\text{FeO}} = 0.864 a_{\text{FeO}(\text{RS})} \quad (10)$$

式中: $a_{\text{FeO}(\text{RS})}$ - 具有正规性质的理想纯液态为参考态; a_{FeO} - 与铁平衡的纯氧化铁为参考态; $\gamma_{\text{FeO}(\text{RS})}$ - 活度系数; χ_i - 转炉渣系中各成分的离子分数。

钢厂冶炼无取向电工钢过程转炉渣的成分如下表3所示。

由(8)、(9)和(10)计算得转炉渣平均 a_{FeO} 为 0.24。为保证转炉冶炼的金属收得率和防止转炉渣氧化性过高污染钢水,现场生产要求炉渣中 T. Fe 控制在 24% 以内,按表2转炉渣成分计算,此时 a_{FeO} 为 0.27。结合(7)式与图3可知,在转炉出钢温度范围内,炉渣平均 a_{FeO} 为 0.24 时,转炉冶炼临界碳含量为 0.031% ~ 0.035%; 炉渣中 T. Fe 为 24%, 对应的临界碳含量为 0.028% ~ 0.031%。综合考虑炉渣的氧化性与温度的影响,转炉出钢碳含量应该不低于 0.031%。

3 精炼过程氧含量控制

冶炼无取向电工钢时,转炉终点碳含量主要分布在 0.02% ~ 0.05%, 出钢后钢中实际氧含量高于平衡时的氧含量。提高钢液洁净度应从夹杂物产生源头抓起,控制转炉终点氧含量在较低的范围^[12]。

表 3 无取向电工钢冶炼过程转炉渣成分

Table 3 Composition of BOF slag in smelting process of non-oriented electrical steel

项目	SiO ₂	CaO	MnO	MgO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	T. Fe	FeO*
炉渣成分/%	16.31	45.35	3.42	7.37	1.96	2.04	19.14	24.31
离子分数 χ_i	0.15	0.47	0.03	0.11	0.02	0.02	-	0.20

*注:按 $\Sigma\text{FeO} = 1.27(\text{T. Fe})$ 折算^[9]

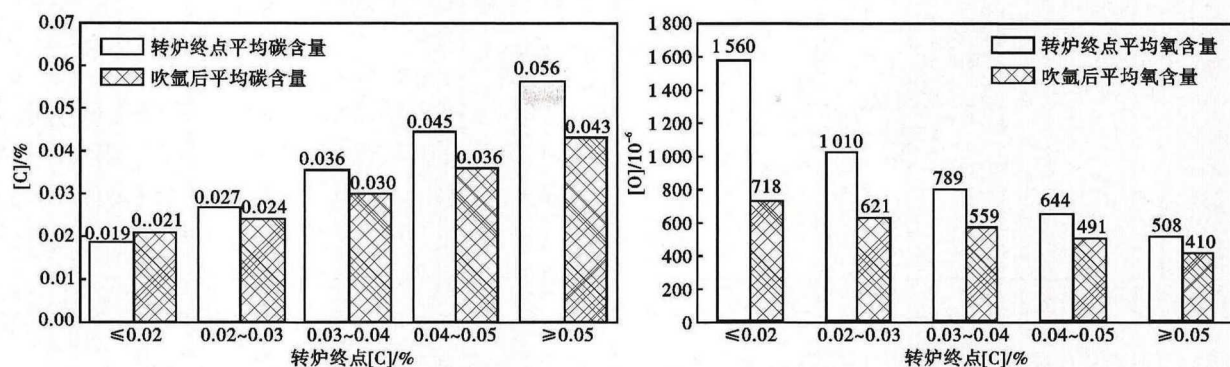


图4 钢包底吹氩气对钢中碳氧含量的影响

Fig. 4 Effect of Ar bottom blowing on C and O content in steel

转炉出钢后,通过钢包底吹氩气去除钢液中过剩氧含量。RH 精炼脱碳过程利用钢液中氧含量或外界补充氧将碳脱至 0.003% 以下,再进行脱氧合金化,脱碳终点氧含量决定钢中氧化物夹杂的生成量。RH 精炼前钢液中碳氧含量是影响 RH 精炼效果的主要因素,通过调控转炉出钢碳氧含量,实现 RH 精炼前钢液碳氧的合理化。

3.1 钢包底吹氩对钢中碳氧含量的影响

现场生产无取向电工钢工艺要求,转炉出钢完毕钢液转到吹氩站,钢包底吹氩气保持 3 min,选择底吹流量为 400 m³/h。底吹的氩气泡推动钢液自下而上运动,均匀钢液成分和温度,氩气泡在钢液中相当于一个个小的真空室,在上升过程中吸附钢液中溶解的气体并能进一步促进碳氧反应,起到很好的真空脱碳脱氧效果^[11]。转炉出钢到吹氩结束钢液温降在 50~70℃。分别统计转炉不同出钢碳含量范围内终点碳氧含量与底吹氩后钢液碳氧含量,如图 4 所示。

对比转炉终点和吹氩后钢水碳氧含量,钢液的平均碳氧积由 0.0027~0.0030 降到 0.0015~0.0017。出钢碳含量小于 0.03% 的炉次经底吹氩后碳含量变化较小,钢液中氧含量降至 600×10⁻⁶~750×10⁻⁶,转炉终点碳含量低,钢液过氧化严重,底吹的氩气主要作用脱去钢液中过剩氧。出钢碳含量为 0.03%~0.05% 的炉次钢液中平均碳氧含量有所降低,可以看出底吹氩气脱去钢液中过剩氧的同时能促进碳氧进一步反应。

3.2 RH 精炼脱碳过程控制

无取向电工钢生产在 RH 精炼过程要完成抽真空、脱碳、脱氧、合金化和净循环等步骤。为完成 RH 精炼任务以及匹配连铸周期,一般要求在 15 min 以内将钢中碳降至 0.003%。RH 进站的钢水初始

条件对 RH 精炼效果有决定性作用。理想的 RH 精炼效果是利用钢液中氧含量进行自然脱碳至目标,脱碳终点氧含量控 150×10⁻⁶~300×10⁻⁶,既可节约脱氧合金的消耗,更重要的是从源头减少了氧化物夹杂的生成,提高钢液的洁净度^[8,12]。

RH 脱碳过程通过降低真空室压力促使碳氧反应来实现。当 RH 精炼前顶渣 T. Fe 含量为 8% 时,顶渣的氧势与钢中的氧势相当,顶渣中的氧不会向钢液中传递,实际计算的碳氧线与理论的碳氧线接近,碳氧含量降低呈现类线性减少的变化趋势即:Δ[C]=0.75Δ[O]^[4,5]。钢厂转炉出钢过程加入 200~300 kg 石灰并控制转炉下渣量,以及在 RH 精炼前顶渣改质,RH 精炼前顶渣成分如下表 3 所示。

根据转炉出钢碳含量将各炉次划分五个部分,不同碳含量范围的炉次到 RH 精炼前碳氧含量如下图 5 所示。按理论 RH 脱碳过程碳氧含量变化计算 RH 脱碳终点氧含量,RH 脱碳终点情况分为 I、II 和 III。

I:RH 精炼前氧含量较高,脱碳速度较快,但脱碳终点氧含量高于 300×10⁻⁶,消耗较多脱氧合金,产生的氧化物夹杂降低钢水洁净度。此范围的炉次为转炉出钢碳含量小于 0.03%。

II:RH 精炼前氧含量在合理位置,RH 脱碳终点氧含量控制为 150×10⁻⁶~300×10⁻⁶。RH 进站碳氧含量分布在 0.025%~0.035% 和 500×10⁻⁶~650×10⁻⁶。此范围转炉出钢碳含量在 0.03%~0.04% 占 66.7%;出钢碳在 0.04%~0.05% 占

表 4 无取向电工钢冶炼过程 RH 精炼前顶渣成分/%
Table 4 Composition of slag before RH refining in steel-making process of non-oriented electrical steel/%

T. Fe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S	MnO
8.25	4.26	50.12	5.31	24.81	1.42	0.08	1.49

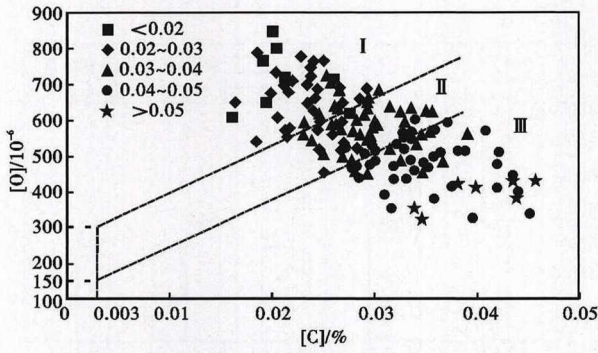


图 5 RH 精炼前碳氧含量与脱碳过程碳氧变化趋势
Fig. 5 C and O content in liquid before RH refining and C and O content change trend during decarbonization process

17.8%。

Ⅲ:RH 精炼前氧含量在 500×10^{-6} 以下, RH 脱碳速度较慢。为保证生产节奏且在预期时间内完成

脱碳,需要采取 RH 吹氧强制脱碳。

4 结论

(1) 转炉冶炼无取向电工钢理论碳氧积为 0.002 5,实际碳氧积明显高于理论值。随着转炉终点碳含量的降低,终点氧含量升高且波动范围大。

(2) 保证 120 t 转炉终点钢中合适的氧含量,出钢碳含量应控制为 0.03% ~ 0.05%。

(3) 钢包底吹氩气可有效降低钢液中过剩氧,促进钢中碳氧进一步反应,降低碳氧积。

(4) 为了达到理想 RH 精炼效果,转炉终点碳含量控制为 0.03% ~ 0.04%,RH 精炼前碳氧含量分别为 0.025% ~ 0.035% 和 $500 \times 10^{-6} \sim 650 \times 10^{-6}$ 。

国家重点研发计划资助(2016YFB0300305)

参考文献

[1] 徐匡迪,肖丽俊.特殊钢精炼中的脱氧及夹杂物控制[J].钢铁,2012,47(10):1-13.
 [2] Suito H, Inoue R. Thermodynamics on Control of Inclusions Composition in Ultra Clean Steels[J]. Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan, 1996, 36(5): 528-536.
 [3] 张明博,秦哲,仇圣桃,等.超低碳钢 BOF 渣成分对终点[C]含量影响[J].北京科技大学学报,2015,37(11):1422-1428.
 [4] 岳峰,崔衡,李朋欢,等.RH 冶炼超低碳钢的最优工艺研究[J].北京科技大学学报,2009,31(s1):53-57.
 [5] 张锦刚,李德刚,于功力,等. IF 钢生产过程中 RH-TB 真空脱碳效果的工艺研究[J].钢铁,2006,41(6):32-34.
 [6] 李朋欢,包燕平,岳峰.超低碳钢的转炉终点控制[J].钢铁,2011,46(10):27-31.
 [7] 曲英.炼钢学原理,第二版[M].北京:冶金工业出版社,1980:138-142.
 [8] 蔡开科.转炉冶炼低碳钢终点氧含量控制[J].钢铁,2009,44(5):27-31.
 [9] 李远洲.氧气转炉炼钢过程的解析与控制[M].北京:冶金工业出版社,2018:48-52.
 [10] Kim S H, Song B. Thermodynamic Aspects of Steel Reoxidation Behavior by the Ladle Slag System of CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃-FeO-MnO-P₂O₅[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 1999, 30(3):435-442.
 [11] 冯聚和.铁水预处理与钢水炉外精炼[M].北京:冶金工业出版社,2006:145-150.
 [12] 蔡开科.转炉-精炼-连铸过程钢中氧的控制[J].钢铁,2004,39(8):49-57.

郭飞虎(1991-),男,硕士生,安徽工业大学(本科)毕业,无取向电工钢产品研发。E-mail:1106743738@qq.com

收稿日期:2019-03-15

下 期 要 目

轧制参数对板带热轧温度分布的影响	郭志强等
基于温度场的 17 t 双流中间包控流装置优化模拟	韩东等
铸态超级双相不锈钢 S32750 热变形行为及组织演变	武敏等
20CrMnTiH 齿轮钢 Φ120 mm 棒材硬点缺陷分析及改善措施	丰年
300 mm × 360 mm 连铸坯生产 Φ80 mm 非调质钢 38MnVS6 工艺实践	王春梅等
高碳绞线钢 SWRH82B 中心碳偏析控制实践	王文培等
常化温度对 2.3% Si 无取向硅钢 2.5 mm 热轧板冲击韧性的影响	张淑娟等
汽车用非调质钢 C38 + N 的研究	李刚等
回火温度对渗碳钢 18Cr2Ni4WA 组织和硬度的影响	刘向艳等