

150 t BOF-LF-VD-CC 流程无铝脱氧工艺高速轨钢 冶炼过程的夹杂物行为

刘 平¹ 李笑英² 智建国¹ 陈爱梅¹

(1 内蒙古包钢钢联股份有限公司, 包头 014010; 2 内蒙古一机集团有限公司, 包头 014010)

摘 要 时速 350 km 高速钢轨要求钢中全氧含量 $T[O] \leq 20 \times 10^{-6}$, 非金属夹杂物 B、C、D 类 ≤ 1.0 级。国内在重轨钢冶炼中, 通常采用无铝脱氧工艺, 即采用 SiCaBa 合金强化脱氧, 形成了低熔点的 Mn-Al-Si-Ba-Ca 多元型氧化物夹杂, 该类夹杂物在精炼中全部排出钢液。研究了铁水预处理脱硫-150 t 顶底复吹转炉-LF-VD-280 mm \times 380 mm 连铸流程冶炼钢轨钢 U71MnG 时的夹杂物行为, 包括无铝脱氧工艺钢轨钢中氧化物夹杂的组成及特征, 转炉终点 [C] 对钢水氧活度的影响以及 LF 精炼渣碱度和 VD 后期软吹氩搅拌对钢氧含量和夹杂物的影响。结果得出, 钢轨头部的 $\leq 20 \mu\text{m}$ 氧化物夹杂为精炼时二次脱氧产物, 通过控制转炉终点 $[C] > 0.15\%$, 控制精炼渣碱度 $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2) = 2.5 \sim 3$, $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 1.0\%$ 可有效降低钢轨钢中氧化物的数量和尺寸。

关键词 150 t BOF-LF-VD-CC 流程 高速钢轨钢 无铝脱氧 夹杂物

Behavior of Inclusions in 150 t BOF-LF-VD-CC Flow Sheet Non-Aluminium Deoxidation Steelmaking Process of High-Speed Rail Steel

Liu Ping¹, Li Xiaoying², Zhi Jianguo¹, and Chen Aimei¹

(1 Inner Mongolia Baotou Steel Union Co Ltd, Baotou 014010; 2 Inner Mongolia First Machinery Group Co Ltd, Baotou 014010)

Abstract Quality requirement for 350 km/h high-speed rail steel is total oxygen content in steel- $T[O] \leq 20 \times 10^{-6}$, and B, C and D series inclusions rating ≤ 1.0 . In domestic heavy rail steel steelmaking process, it is normally to using non-aluminium deoxidation process, i. e. intensifying deoxidation by using SiCaBa alloy to form low melting point Mn-Al-Si-Ba-Ca multicomponent oxide inclusions which all remove from liquid during refining process. The behavior of inclusions in rail steel U71MnG steelmaking by hot metal desulphurization pretreatment-150 t top and bottom combined blowing converter-LF-VD-280 mm \times 380 mm CC flow sheet is studied, including the ingredient and characteristics of oxide inclusions in rail steel steelmaking by non-aluminium deoxidation process, the effect of converter end [C] on oxygen activity of liquid and the effect of basicity of LF refining slag and soft argon stirring process in later period of VD process on inclusions and oxygen content in steel. It is obtained that the $\leq 20 \mu\text{m}$ oxide inclusions in head of rail is secondary deoxidation products during refining process, with controlling converter end $[C] > 0.15\%$, controlling basicity of refining slag- $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2) = 2.5 \sim 3$ and $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 1.0\%$, it is available to decrease the quantity and size of oxides in rail steel.

Material Index 150 t BOF-LF-VD-CC Flow Sheet, High-Speed Rail Steel, Non-Aluminium Deoxidation, Inclusions

高速钢轨的制造和使用双方, 最担心的是钢轨在运行中产生核伤。核伤是一种钢轨疲劳断裂形式的俗称, 即在交变应力作用下, 亚表层缺陷处萌生裂纹并呈贝壳状扩展, 最后导致钢轨的断裂^[1-3]。产生的主要原因是钢轨内部存在缺陷, 夹杂物实际起到了裂纹源的作用, 其中 B 类夹杂物的危害最大^[3,4]。

1 重轨钢生产工艺和钢轨中的非金属夹杂物

按照中国铁道部颁布的 TB/T3276-2011 标准, 时速 250 km 高速钢轨的钢种为 U71MnG, 钢的化学成分见表 1。同时规定钢水中氢 $\leq 0.00025\%$ 、全氧 $\leq 0.0020\%$ 、氮 $\leq 0.0080\%$, 钢中非金属夹杂物 B、C、D 类 ≤ 1.0 级。为了满足标准要求, 国内重轨钢厂普遍采用无铝脱氧工艺生产, 即在转炉冶炼终点,

表 1 U71MnG 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of steel U71MnG / %

| C | Si | Mn | P | S | V | Al |
|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.65 ~ 0.75 | 0.15 ~ 0.58 | 0.70 ~ 1.20 | ≤ 0.025 | ≤ 0.025 | ≤ 0.030 | ≤ 0.004 |

出钢过程中采用钙系脱氧剂, 如硅钙钡或硅钙钡镁; 在 LF 精炼中采用钙系脱氧剂, 并造 CaO-SiO₂-CaF₂ 渣系, 以减少钢中含铝量和氧化铝类夹杂物。包钢高速轨钢的生产流程为“铁水预处理脱硫-150 t 顶底复吹转炉冶炼-LF 精炼-VD 真空处理-连铸”:

(1) 采用 KR 法对铁水进行脱硫处理。脱硫剂采用活性石灰, 140 t 铁水消耗脱硫剂 6 ~ 8 kg, 进站铁水硫含量为 0.03% ~ 0.05%, 出站铁水硫含量为

0.002% ~ 0.010%。

(2) 150 t 顶底复吹转炉, 3.5 m³/(t · min) 供氧强度, 采用恒压变枪位操作, 单渣法冶炼, 冶炼周期小于 35 min。终点钢水成分控制目标为 [C] ≥ 0.010 0%、[P] ≤ 0.015%, 温度控制大于 1 620 ℃。终脱氧剂采用硅钙钡。

(3) 150 t 双工位 LF 精炼, 升温速度 4 ~ 5 ℃/min。生产中采用的造渣材料有白灰、萤石、电石, 脱氧剂采用硅钙钡合金。实测精炼渣组成见表 2。

当 VD 真空度 ≤ 100 Pa, 钢水进入深真空期, 经过 13 min 后破空。再进行弱搅拌 10 min 以上。

(4) 采取全程保护浇铸, 通过长水口吹氩气; 40 t 中间包。280 mm × 380 mm 坯连铸中采用 MEMS 和凝固末端轻压下。连铸坯经酸浸低倍评级, 各项指标均 < 1 级。

由钢轨头部取样分析得出, 在钢轨头部存在尺寸 < 10 μm 的球状氧化物夹杂, 氧化物夹杂的元素组成为 Ca-Si-Al-Mg-O, 其质量分数分别为 28.7% - 9.2% - 3.5% - 6.4% - 50.2%。图 1 为夹杂物能谱曲线和元素组成。

2 无铝脱氧冶炼工艺下钢中夹杂物的变化

2.1 夹杂物组成及特征

通过能谱分析夹杂物元素组成和含量(表 3), 可见在冶炼过程中出现两类氧化物夹杂, 一类夹杂物的元素组成为 Si-Ca-Ba-Mn-Al-Mg, 出现在转炉出钢脱氧合金化后和 LF 精炼前期, 外形尺寸较大; 另一类夹杂物的元素组成为 Ca-Si-Mg-Al, 出现在 LF 精炼前期、LF 精炼结束、VD 结束, 即精炼以后始终存在, 外形尺寸较小。

由表 4 可见, 第一类夹杂物主要特征为 Ca/Si < 1、高 Mn(10% ~ 30%), 从转炉出钢后到 LF 精炼前期, 夹杂物的组元含量发生变化, 含 Mn 降低、Ca/Si 值增大。第二类夹杂物主要特征为 Ca/Si > 2, 从 LF 精炼到 VD 处理结束, 夹杂物的组元含量发生变化, 即 Ca/Si 值增大。

2.2 结果分析与讨论

转炉在出钢过程中根据脱氧合金化的需要, 加入硅钙钡、硅锰、锰铁合金, 这些复合金属与钢水中的氧发生反应, 形成一次脱氧产物。根据钢液中元素脱氧反应的自由能与温度的关系^[5], 在 1 600 ℃ 元素脱氧能力为 Ca > Ba > Si > Mn, 但是由于在转炉终点钢水中氧活度达到 0.020 0% 以上, 且加入合金的

表 2 LF 精炼渣组成 / %

Table 2 Ingredient of LF refining slag / %

| | | | | | |
|------------------|---------|-------|--------------------------------|-------------|------------------|
| SiO ₂ | CaO | MgO | Al ₂ O ₃ | (FeO + MnO) | CaF ₂ |
| 17 ~ 20 | 40 ~ 56 | 6 ~ 9 | 5 ~ 9 | 0.6 ~ 1.1 | 10 ~ 15 |

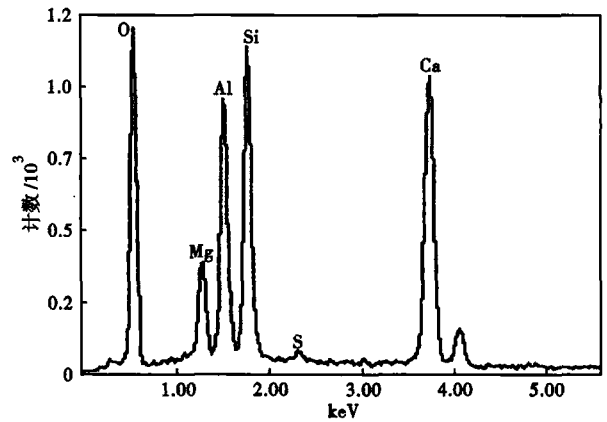


图 1 无铝脱氧下钢轨中氧化物夹杂组成

Fig. 1 Analysis of oxide inclusions in rail steel steelmaking with non-aluminium deoxidation

硅、锰含量较高, 根据钢中元素的脱氧平衡常数与温度的关系^[5], 在 1 600 ℃ Mn 也能够参加钢水脱氧反应。因此 Mn、Si、Ca、Ba 元素全部参与了脱氧反应, 形成了尺寸 < 100 μm 的 Si-Ca-Ba-Mn-Al-Mg 氧化物夹杂, 即表 4 中的第一类夹杂物。由于 MnO 的稳定性差, 在 1 600 ℃ 下当钢水中氧活度降到 0.002% 以下时, 将发生分解^[5], 因此当钢水进入 LF 精炼位以后, 随着钢中氧活度的进一步降低, 第一类夹杂物中含 Mn 降低、Ca/Si 值增大。

从 LF 精炼开始到 VD 处理结束, 随着对钢水的进一步脱氧, 钢中氧活度从 0.002 5% 降低到 0.001 0%, 钢水在二次脱氧中形成 20 μm 以下的 Ca-Si-Mg-Al 氧化物夹杂, 随着钢水的氧活度降低, 夹杂物中 Si-O 发生分解, Ca/Si 值增大。

可见, 在转炉出钢过程中脱氧形成的夹杂物在 LF 精炼中能够全部上浮进入渣中。在钢轨头部见到的夹杂物产生于精炼和 VD 处理过程中。因此,

表 3 不同冶炼工序钢中, SEM、能谱分析典型氧化物夹杂元素含量及尺寸

Table 3 Element content and size of typical oxide inclusions in different steelmaking process, SEM, energy spectrum analysis

| 工序 | 夹杂物元素含量 / % | | | | | | 夹杂物尺寸 / μm |
|-------|-------------|------|------|-------|-------|-------|------------|
| | Mg | Al | Si | Ca | Ba | Mn | |
| 转炉出钢后 | 1.25 | 7.03 | 8.13 | 5.95 | 6.91 | 25.63 | < 100 |
| LF 前期 | (1) | 1.82 | 4.45 | 13.70 | 14.90 | 13.22 | < 50 |
| | (2) | 3.0 | 4.66 | 7.9 | 16.77 | | < 20 |
| LF 结束 | 4.07 | 4.98 | 9.47 | 24.01 | | | < 20 |
| VD 后 | 5.76 | 4.14 | 9.73 | 32.09 | | | < 10 |

表4 转炉出钢脱氧和 LF 精炼形成的夹杂物的特征对比
Table 4 Comparison of characteristics of inclusions formed in converter tapping deoxidation and LF refining

| 项目 | 转炉出钢脱氧产生的夹杂(第一类) | LF 精炼中形成的氧化物夹杂(第二类) |
|----------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 主要元素 | Si, Ca, Mn, Ba | Si, Ca |
| 次要元素 | Al, Mg | Al, Mg |
| 特征 | Ca/Si < 1, (Ca + Si) < 30%, Mn < 30%, (Al + Mg) < 15% | Ca/Si > 2, (Ca + Si) > 25%, (Al + Mg) < 15% |
| 夹杂物尺寸/ μm | < 100 | < 20 |

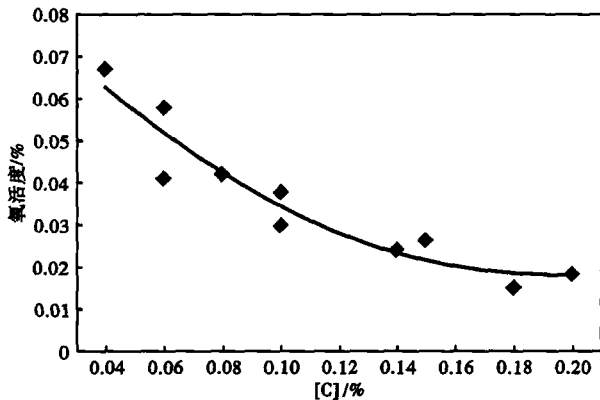


图2 转炉冶炼终点钢水碳含量与氧活度的关系

Fig. 2 Relation between oxygen activity and carbon content in liquid at converter end

要想减少钢轨中的氧化物夹杂,就必须减少精炼中夹杂物产生的数量,并促进夹杂物上浮排出。

3 钢中氧含量和夹杂物控制

3.1 降低转炉终点钢水氧含量

图2为实测转炉冶炼终点钢水碳含量与氧活度的关系,可见当[C]为0.16%时,对应钢水氧活度0.0200%;当[C] > 0.16%时,钢水氧活度下降斜率减小;当[C] < 0.16%时,钢水氧活度上升斜率增大。

因此在生产中要做到出钢碳含量大于0.15%,并力争一次拉碳出钢。为了保证转炉终点C、P、温度同时命中,相应采取适当减少废钢加入量,增大供氧强度,强化底吹的措施。因为一次脱氧产物能够在后续LF精炼中去除,因此强化罐内脱氧,最大限度的脱除初炼钢水中的氧,可以减少LF精炼中细粒氧化物夹杂的量。生产中罐内钢水氧活度目标要达到小于0.0020%。

3.2 利用精炼渣减少并改变夹杂物

进一步降低钢水氧含量的措施是对钢水和炉渣脱氧,防止炉渣中的复合阴离子向钢水传递氧。同时,形成有利于吸附夹杂物的精炼渣。

采用SiBaCa合金脱氧,并添加白灰、萤石造渣,

将形成CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO-CaF₂系精炼渣。渣中Al₂O₃、MgO来自耐火材料,含量较低,含量相对稳定。对精炼渣物性影响较大的是碱度R(SiO₂/CaO)和CaF₂。当精炼渣中(Al₂O₃)为10%、碱度从1.0逐渐增大到4.0时,钢中全氧降低,夹杂物的总数、总面积和平均半径减小,半径小于2 μm 的夹杂物比例增大,说明高碱度渣对非铝脱氧钢中的脱氧产物吸附以及对细小夹杂物的生成有利^[6]。但是当R > 3时,渣的熔点升高,在炼钢温度下,粘度变大,动力学条件变坏,需要补充萤石化渣,对炉衬和环境影响较大。因此,合适的炉渣碱度为(CaO)/(SiO₂) = 2.5 ~ 3, $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 1.0\%$ 。

LF精炼以后,转炉脱氧产物全部去除,部分二次脱氧产物去除,钢水氧活度降到 $\leq 0.0015\%$ 。钢水经VD处理后,氧含量进一步下降,氧活度 $\leq 0.0010\%$ 。

利用VD过程中钢-渣的剧烈混合,细小的夹杂物聚集并吸附。后期通过软吹氩,使钢渣分离。最终留在钢水里的为 $\leq 10 \mu\text{m}$ 的细小夹杂物。

4 结论

(1) 转炉高碳出钢,采用钙系脱氧剂硅钙钡镁或硅钙钡合金强化脱氧,以及锰铁合金化,形成了小于100 μm 的大颗粒MnAlSiBaCa多元型氧化物夹杂,该夹杂物能够在精炼中全部排出钢液。

(2) 钢轨中常规氧化物夹杂是 $\leq 20 \mu\text{m}$ 的Ca-SiAlMg氧化物,为精炼后期二次脱氧产物。采用(CaO)/(SiO₂) = 2 ~ 3, $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 1.0\%$ 工艺,VD后钢中夹杂物尺寸 $\leq 10 \mu\text{m}$ 。

参考文献

- [1] 陈颜堂,刘东雨,方鸿生,等. 钢轨钢的接触疲劳损伤及实验研究[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(1): 52-55.
- [2] 张伟,郭俊,刘启跃. 钢轨滚动接触疲劳研究[J]. 润滑与密封, 2005(6): 195-198.
- [3] 徐罗平,蒋克,徐莉,等. 进口钢轨核伤原因分析[J]. 理化检验-物理分册, 1997, 33(4): 35-37.
- [4] 单麟天. 钢轨钢中的夹杂物与脱氧制度[J]. 钢铁, 1997, 32(5): 81-84.
- [5] 赵沛. 炉外精炼及铁水预处理使用技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 48-60.
- [6] 李阳,姜周华. 精炼渣对非铝脱氧钢中夹杂物影响的实验研究[J]. 中国冶金, 2006, 16(6): 28-31.

刘平(1964-),男,硕士,正高级工程师,1987年内蒙古科技大学毕业,重轨钢冶炼和质量控制。

E-mail: liuping@btsteel.com

收稿日期: 2013-04-22