

# Analysis of the Influence Factors of LF Furnace Silicon Reversion in Low Carbon Steel Treatment

Kaimin Luo\*, Suicheng Jing, Zhibin He

Steelmaking Plant of Zhanjiang Iron & Steel Limited Corporation of Baosteel, Zhanjiang Guangdong  
Email: \*684959@baosteel.com

Received: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2019; accepted: Dec. 9<sup>th</sup>, 2019; published: Dec. 16<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

Based on 350 t LF furnace melting process data, this paper has analyzed the effect of process parameters control of LF furnace on low carbon steel silicon reduction. The results showed as follows. At the end-point of LF treatment, reaction of silicon is far from balance; the (SiO<sub>2</sub>) of slag still can be reduction. Silicon content of liquid steel reduces with the rising of initial temperature of LF furnace and silicon content of liquid steel reduces with the reducing of aluminum content. When the aluminum content is less than 0.03%, it is favorable to realize silicon content less than 0.03%. Adopting aluminum iron deoxidation and keeping slag a little reduction atmosphere is favorable to reducing silicon reduction and also meeting the de-sulf request of slag. When initial temperature controlled at 1600°C ± 10°C, aluminum content controlled between 0.02% to 0.04%, adopting deoxidation with Fe-AL alloy instead of aluminum slag and shortening LF treatment time, it can realize silicon content less than 0.03% stably.

## Keywords

LF Furnace, Low Carbon Steel, Silicon Reversion

## 低碳钢LF炉硅还原影响因素分析

罗开敏\*, 靳随城, 何志斌

宝钢湛江钢铁有限公司炼钢厂, 广东 湛江  
Email: \*684959@baosteel.com

收稿日期: 2019年11月22日; 录用日期: 2019年12月9日; 发布日期: 2019年12月16日

## 摘要

本文结合350 t LF炉低碳钢冶炼过程数据, 分析了LF炉过程参数控制对低碳铝镇静钢回硅的影响。结果

\*通讯作者。

表明：LF炉处理结束后，硅的还原反应远没有达到平衡，渣中(SiO<sub>2</sub>)仍可被还原；随着LF炉初始温度的增加，回硅量逐渐降低；随着铝含量的降低，钢水回硅量逐渐减少，当过程铝含量低于0.03%时，有利于将硅含量控制到0.03%以下；采用铝铁脱氧，使炉渣保持一定的弱氧化性，可以保证脱硫效果的同时，有效降低硅的还原。通过将LF炉初始温度控制在1600℃ ± 10℃，过程铝含量控制到0.02%~0.04%，使用铝铁代替铝渣脱氧，同时缩短LF炉处理时间，可以将低碳铝镇静钢硅含量稳定控制到0.03%以下。

## 关键词

LF炉，低碳铝镇静钢，硅还原

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

低碳铝镇静钢多为热轧向钢种，对成分硅的要求比较严格，通常硅含量要控制到 0.03% 以下，当硅含量超过 0.03% 时，钢材屈服强度和抗拉强度上升，严重影响钢材冲压性能[1]。湛江钢铁炼钢厂低碳铝镇静钢工艺流程为 KR→LD→LATS→CC。正常情况下，转炉吹炼结束后，钢水中硅被氧化至微量，完全符合钢种要求。但 KR 故障或定修时，转炉出钢后钢水需要进 LF 炉脱硫，对应工艺流程为 LD→LF→CC。LF 处理过程中，渣中(SiO<sub>2</sub>)会被还原进入钢水，导致钢水硅含量增加，2018 年以来数次出现硅含量超标，改钢降级的问题。因此，有必要对影响 LF 炉钢水回硅的因素进行分析，稳定控制钢水硅含量。

转炉采用前后挡渣或留钢留渣操作，减少炉后下渣量[2]可以从根本上减少硅的还原，但是前后挡渣操作会严重缩短转炉滑板使用寿命，影响生产节奏；留钢 - 留渣操作，留钢量无法稳定控制，会对炉产量的稳定造成一定的负面影响。因此，本文主要分析 LF 炉过程参数控制对钢水回硅量的影响，通过改变 LF 炉造渣方法，加强温度、过程铝含量及处理时间的控制，达到降低 LF 炉处理过程钢水回硅量得目的。

## 2. LF 炉回硅分析

LF 炉处理过程中，钢水回硅反应方程式如下所示[3]：



$$\Delta G^\theta = -658027.31 + 107.1T = -RT \ln K^\theta \quad (2)$$

$$\omega_{[\text{Si}]} = \left( \frac{K^\theta \cdot a_{(\text{SiO}_2)}^2 \cdot f_{[\text{Al}]}^4 \cdot \omega_{[\text{Al}]}^4}{f_{[\text{Si}]}^3 \cdot a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)}} \right)^{1/3} \quad (3)$$

式中： $\omega_{[\text{Si}]}$ ——钢液中硅的质量分数； $K^\theta$ ——标态平衡常数； $a_{(\text{SiO}_2)}$ ——渣中(SiO<sub>2</sub>)活度； $a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)}$ ——渣中(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)活度； $f_{[\text{Si}]}$ ——钢液中硅的活度系数； $f_{[\text{Al}]}$ ——钢液中铝的活度系数。

湛江钢铁未脱硫铁水，转炉吹炼结束后钢水硫含量范围为 0.015%~0.040%，而低碳铝镇静钢，由于钢种的不同，硫含量上限在 0.006%~0.020% 之间，LF 炉脱硫前后钢液及炉渣成分如表 1 和表 2 所示。

由于 LF 炉处理终钢水硅和铝含量较低，钢液中硅活度系数  $f_{[\text{Si}]}$  和铝活度系数  $f_{[\text{Al}]}$  均取 1，渣中(SiO<sub>2</sub>)和(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)活度可由熔渣等活度图确定[4]。将炉次结束温度、钢液及炉渣成分带入(2)~(3)式计算可得，LF 炉处理结束时的钢水硅含量与平衡硅含量的关系如图 1 所示。从图 1 可知，LF 炉处理结束时，钢液回硅

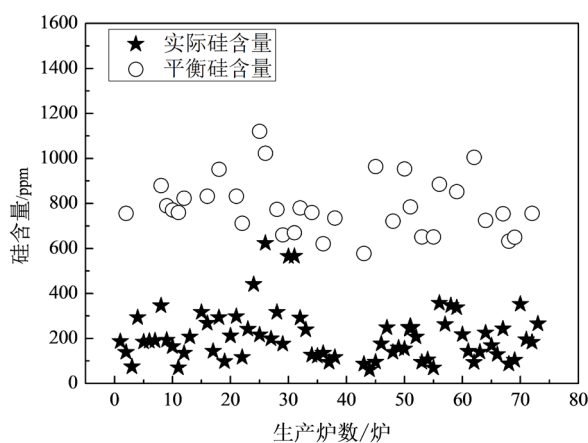
反应远未达到平衡状态, 实际硅含量约为平衡硅含量的三分之一, 即 LF 炉处理结束后, 渣中( $\text{SiO}_2$ )仍然具有强烈的还原趋势, 在适当的反应条件下, 钢水硅含量仍然可能进一步增加[5]。同时由( $\text{SiO}_2$ )-[Al]反应方程式可知: 降低渣中( $\text{SiO}_2$ )含量或降低钢液铝含量均可减少硅的还原, 增加渣中( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )含量或提高钢水温度也可以一定程度抑制硅还原反应的发生。

**Table 1.** Temperature and composition change of low carbon steel before and after LF desulfurization  
**表 1.** 低碳钢 LF 炉脱硫前后钢水温度及成分变化

项目	温度/°C	钢液及炉渣成分质量分数/%				
		C	Si	Mn	S	Al
处理前	1564~1630	0.026~0.065	0.0002~0.0121	0.048~0.013	0.0150~0.0387	0.005~0.081
处理后	1575~1603	0.034~0.072	0.0058~0.0687	0.150~0.463	0.0020~0.0196	0.035~0.060

**Table 2.** Slag composition change before and after LF treatment of low carbon steel  
**表 2.** 低碳钢 LF 炉处理前后炉渣成分变化

项目	炉渣各成分质量分数/%					
	CaO	$\text{SiO}_2$	MgO	MnO	T.Fe	$\text{Al}_2\text{O}_3$
处理前	20.96~41.15	6.4~12.5	6.75~11.9	1.95~3.1	8.60~16.32	29.5~40.3
处理后	35.50~56.5	4.2~8.9	4.46~12.18	1.01~1.95	0.39~8.65	33.1~45.6

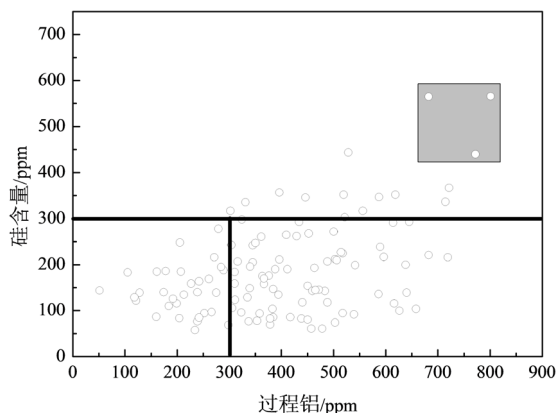


**Figure 1.** Relationship between actual silicon content and calculation balance silicon content of LF treatment  
**图 1.** LF 炉处理结束实际硅含量与平衡硅含量的关系

### 3. 过程铝含量对硅还原的影响

LF 炉处理过程中, 必须保证钢液铝含量降低钢液及渣中氧, 才能确保脱硫效果, 但钢水铝含量增加, 会促进渣中( $\text{SiO}_2$ )的还原, 钢水回硅量增加。处理前渣中( $\text{SiO}_2$ )含量 6.40%~12.5%, ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )含量 29.5%~40.3%的条件下, 过程铝含量与成品硅含量的关系如图 2 所示。

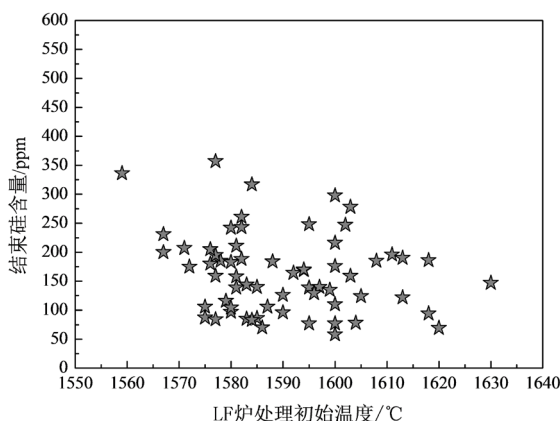
从图 2 可知, 随着过程铝含量的增加, 钢液硅含量呈增加的趋势。当过程铝低于 0.03%时, 成品硅可以稳定控制在 0.03%以下; 过程铝均高于 0.07%时, 基本所有炉次硅含量均在 0.03%以上。为了降低钢液回硅量, 过程铝应控制到 0.03%以下, 但研究表明[6], 铝含量低于 0.02%时, 渣-金硫分配比急剧降低, 炉渣脱硫能力变差, 铝含量在 0.03%左右时, 实际硫分配最佳, 综合考虑脱硫效果和回硅量, LF 炉脱硫过程铝目标可控制在 0.02%~0.04%之间。



**Figure 2.** The effect of process aluminum content on silicon reversion  
**图 2.** LF 处理过程铝对回硅的影响

#### 4. 初始温度对硅还原的影响

温度 LF 炉最重要的参数之一，其对处理时间，化渣速度和脱硫速率有直接影响。在过程铝含量 0.02%~0.04% 的条件下，LF 炉初始温度与钢水回硅量的关系如图 3 所示。



**Figure 3.** The effect of initial temperature of LF furnace on silicon reversion  
**图 3.** LF 炉处理初始温度对回硅的影响

从图 3 可知，随着初始温度的增加，LF 炉结束硅含量呈降低的趋势，硅含量超 0.03% 的炉次，初始温度均低于 1580℃；初始温度高于 1605℃ 时，硅含量可以稳定控制在 0.025% 以下。分析认为，随着初始温度的增加，化渣速度增快，脱硫速率增加，LF 处理周期缩短，有效减少回硅量。从热力学的角度来看，由 (2) 式可知，提高温度一定程度上抑制了硅的还原，适当提高 LF 炉初始温度有利于降低钢水回硅量，综合考虑温度控制的可操作性及回硅量控制，LF 进站初始温度可控制在 1600℃ ± 10℃ 之间。

#### 5. 辅料加入对硅还原的影响

湛江钢铁 LF 炉脱硫，采用铝铁和铝渣同步脱氧(铝铁脱钢水氧，铝渣脱渣中氧)。铝渣为成分以金属铝、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CaO 为主的球状辅料，其特点是铝含量高，密度小，直接加入渣中可迅速将渣里氧化铁和氧化锰还原，形成高还原性炉渣，实现钢水的快速脱硫和深脱硫。但是高还原性渣，容易导致钢水脱硫过深，远超低碳铝镇静钢要求，同时渣中(SiO<sub>2</sub>)更容易被还原，钢水硅含量增加。铝铁脱氧和铝渣脱氧回硅情况如图 4 所示。

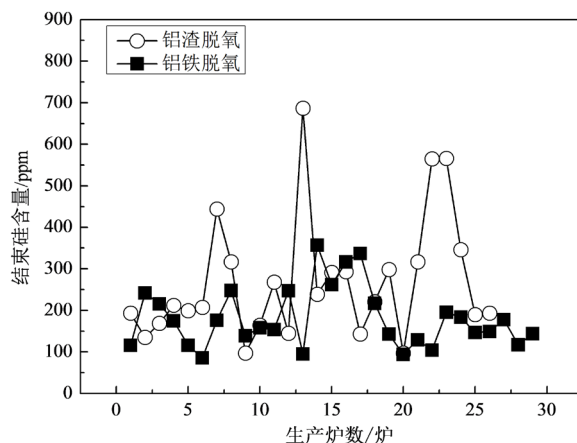


Figure 4. The effect of deoxidation method on silicon reversion  
图 4. 脱氧方式对硅还原的影响

从图 4 可知, 加铝渣炉次硅含量控制不稳定, 波动较大, 多个炉次硅含量在 0.04% 以上; 铝铁脱氧炉次, 硅含量波动较小, 硅含量最高仅为 0.035%, 回硅量整体控制稳定。分析认为, 铝铁比重大, 投入后直接加到钢水中, 脱完钢液中氧后, 再以扩散脱氧的方式脱渣中氧, 渣中全铁含量在 3% 左右, 使炉渣保持一定弱氧化性, 有效降低了硅的还原。铝铁脱氧, 炉渣脱氧不完全, 炉渣脱硫能力相对变差, 但是低碳铝镇静钢本身对硫含量要求不高, 完全可以满足钢种脱硫要求。

## 6. 改进后回硅情况

2018 年 1~12 月, 湛江钢铁 LF 炉生产低碳铝镇静钢 149 炉, 硅高于 0.03% 炉数 20 炉, 数次出现改钢降级的的问题。通过将 LF 进站目标温度控制在  $1600^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , 过程铝含量控制到 0.02%~0.04%, 用铝铁代替铝渣脱渣中氧及缩短 LF 处理周期, 目前 LF 回硅量可以稳定控制在 0.03% 以下, 2019 年 1 月至今, LF 炉生产低碳钢 27 炉, 硅含量低于 0.03% 炉数 27 炉, 没有出现改钢降级的的问题, 具体回硅情况如图 5 所示。

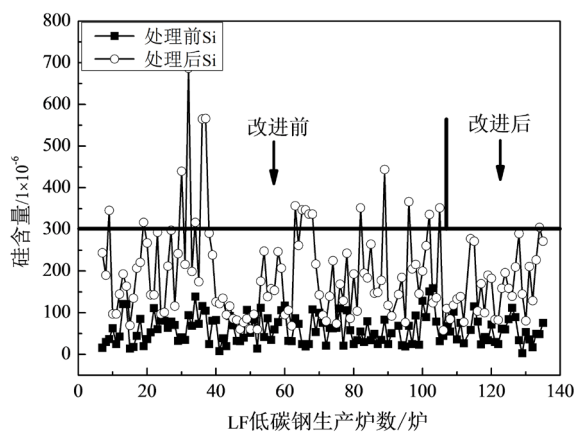


Figure 5. Comparison of silicon content before and after optimization  
图 5. 改进前后回硅量对比

## 7. 结论

1) LF 炉处理结束后, 渣-金之间硅还原反应远没有达到平衡, 渣中( $\text{SiO}_2$ )仍然可能被还原, 钢水硅含量增加。

2) 随着过程铝含量的增加,回硅量增加。在 LF 炉处理前硅含量  $\leq 12.5\%$  时,过程铝含量低于  $0.03\%$  时,有利于将回硅量控制在  $0.03\%$  以下。随着 LF 炉初始温度的增加,化渣速度增快,脱硫速率增加,处理时间变短,钢水硅还原量降低。

3) 采用铝铁代替铝渣脱渣中氧,使炉渣保持一定的弱氧化性,可以满足低碳铝镇静钢脱硫要求的同时,有效降低钢水回硅量。

4) 渣中初始( $\text{SiO}_2$ )含量  $\leq 12.5\%$  时,通过将 LF 炉初始温度控制在  $1600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ,过程铝含量控制到  $0.02\% \sim 0.04\%$ ,采用铝铁代替铝渣脱氧,同时缩短 LF 炉处理时间,可以将低碳铝镇静钢硅含量稳定控制到  $0.03\%$  以下。

## 参考文献

- [1] 胡大,周春全,孙彦辉,等. CSP 流程冷轧基板钢中 Si 的控制[J]. 河南冶金, 2006, 14(1): 137.
- [2] 李军辉,苏利川,龙广. LF 精炼低碳低硅钢增硅问题的探讨[J]. 浙江冶金, 2010(10): 26-27
- [3] 徐涛,孙彦辉,许中波. SPHC 钢 LF 精炼过程钢水增硅分析[J]. 钢铁, 2009, 44(6): 28-30.
- [4] 郭汉杰. 冶金物理化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 54.
- [5] 曾加庆,张建平,范鼎东. 马钢 CSP 流程对钢水硅含量的控制[J]. 钢铁, 2005, 40(10): 29-31.
- [6] 程子建,郭靖,程树森. 酒钢 SPCC 钢的 LF 精炼脱硫[J]. 钢铁研究学报, 2012, 24(9): 10-15.