

## KR-BOF-RH 流程高牌号无取向硅钢 W310 超低硫冶炼研究与实践

徐小伟

(马鞍山钢铁股份有限公司制造管理部, 马鞍山 243011)

**摘要:** 高牌号无取向硅钢 W310 成品硫含量一般要求小于 0.002 5%。基于“KR 铁水脱硫→顶底复吹转炉→RH 真空炉→连铸”制造流程,分析研究了 KR 深脱硫、转炉冶炼、RH 喷粉脱硫机理,结合 300 t 炼钢系统工况及原料条件,提出了铁水成分、温度优化, KR、RH 脱硫剂成分调整,转炉热平衡控制、强底吹冶炼,工序硫负荷管控等热力学、动力学条件改善措施。应用表明:优化后 KR 一次处理硫含量小于  $15 \times 10^{-6}$  炉次比例由 69% 提升到 100%,处理后硫含量由  $10.48 \times 10^{-6}$  下降到  $7.07 \times 10^{-6}$ ;转炉终点平均硫含量  $20.10 \times 10^{-6}$ ,过程回硫  $13.03 \times 10^{-6}$ ,较优化前分别降低 44.8%、49.8%;RH 钢液硫含量由  $19.50 \times 10^{-6}$  降至  $8.65 \times 10^{-6}$ ,脱硫剂用量减少 55.9%,硫含量小于  $25.00 \times 10^{-6}$  比例由 90.5% 提升到 100%,取得了良好的效果

**关键词:** W310 硅钢; 冶炼; 脱硫; 增硫; 热力学

## Research and Practice on Ultra Low Sulfur Smelting of High-Grade non-Oriented Silicon Steel W310 by KR-BOF-RH Process

Xu Xiaowei

(Manufacturing management department of Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'anshan 243011)

**Abstract:** The sulfur content in high-grade non-oriented silicon steel W310 is generally required to be less than 0.002 5%. Based on the manufacturing process of “KR→BOF→RH→continuous casting”, the mechanism of KR deep desulphurization, converter smelting and RH powder spraying desulphurization are analyzed and studied in this paper, combined with the working conditions and raw material conditions of the 300 t steel-making system, the thermodynamic and kinetic conditions improvement measures such as optimization of hot metal composition and temperature, composition adjustment of KR and RH desulfurizer, converter heat balance control, strong bottom blowing smelting and process sulfur load control are put forward. Application results show that after optimization, the ratio of sulfur content less than  $15 \times 10^{-6}$  in once KR treatment has increased from 69% to 100%, and the sulfur content after treatment has decreased from  $10.48 \times 10^{-6}$  to  $7.07 \times 10^{-6}$ . The average sulfur content at the end point of converter is  $20.10 \times 10^{-6}$ , and sulfur pick-up by  $13.03 \times 10^{-6}$  during process, which are 44.8% and 49.8% lower than before optimization, respectively. The sulfur content of RH liquid steel decreases from  $19.50 \times 10^{-6}$  to  $8.65 \times 10^{-6}$ , the dosage of desulfurizer decreases by 55.9%, and the proportion of sulfur less than  $25.00 \times 10^{-6}$  increases from 90.5% to 100%, good results have been achieved.

**Key Words:** Silicon Steel W310; Smelting; Desulphurization; Sulfur Pick-up; Thermodynamics

硅钢是一种含碳极低的铁硅软磁合金,具有低铁损、高磁感等电磁特性,广泛应用于电机、发电机及变压器铁芯的制造,是电力、电子不可或缺的功能材料<sup>[1-2]</sup>。无取向硅钢中 S 是一种有害元素<sup>[3]</sup>,文献[4-6]指出,硫是第二相的主要组成元素,其析出物不但在退火过程中抑制再结晶晶粒长大,降低成品晶粒尺寸、恶化铁损,还直接影响磁畴壁移动,增加磁化过程中磁畴转动的能量,使硅钢材料磁化难度增大,磁感降低。随钢中硫含量的升高,铁损增加、磁感应强度下降,牌号越高,影响越明显,因此,高牌号无取向硅钢中一般要求硫质量分数控制在

$25.00 \times 10^{-6}$  以下,甚至  $10.00 \times 10^{-6}$  以下<sup>[7]</sup>。

马钢 300 t 转炉系统采用“KR→转炉→RH→连铸”工艺流程进行硅钢生产,冶炼高牌号硅钢 W310 时,突出的问题与矛盾如下:

(1) 铁水一次处理后硫质量分数超过  $15 \times 10^{-6}$  偏多,二次处理炉次达 30% 以上,脱硫时间偏长;

(2) 转炉冶炼过程中,终点硫均值  $36.42 \times 10^{-6}$ ,钢水回硫量平均达  $25.94 \times 10^{-6}$ ,最大超过  $70 \times 10^{-6}$ ;

(3) RH 脱硫剂用量大,处理终点硫含量偏高。

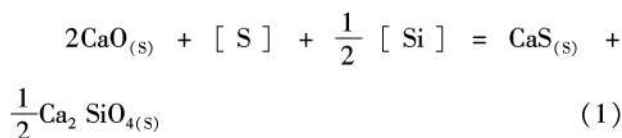
为解决上述问题,在理论分析的基础上,结合

300 t 炼钢系统工况及铁水条件,通过铁水成分、温度的选择、脱硫剂成分调整及系统热力学、动力学条件改善等手段,形成了 KR 快速深脱硫、转炉极低回硫控制、RH 高效喷粉、工序硫负荷管控等较为系统的超低硫冶炼技术,应用后 KR 处理后平均硫含量达  $7.07 \times 10^{-6}$ ,一次合格率 100%,转炉终点平均回硫量  $13.03 \times 10^{-6}$ ,RH 钢液硫含量降至  $8.65 \times 10^{-6}$ ,脱硫剂用量减少 55.9%。

## 1 各工序脱硫影响因素分析

### 1.1 KR 铁水脱硫

KR 脱硫使用的脱硫剂主体是石灰,在铁水中 Si 元素耦合作用下,处理过程中脱硫反应见式(1)<sup>[8]</sup>。



$$\lg k_1 = \frac{13\,125.25}{T} - 4.35 \quad (2)$$

表 1 为铁水中主要元素相互作用系数<sup>[9]</sup>,由其可计算不同铁水成分条件下硅、硫活度系数,结合式(2)<sup>[8]</sup>铁水脱硫反应平衡常数,热力学上可以定量确定反应式(1)能达到的最大脱硫限度,典型铁水温度、成分下的计算结果见表 2。

由表 2 可知,在  $[\text{Si}] 0.30\% \sim 0.50\%$ 、 $[\text{C}] 4.0\% \sim 4.50\%$ ,温度  $1\,200 \sim 1\,500\text{ }^\circ\text{C}$  条件下,平衡硫最大值为  $2.31 \times 10^{-6}$ ,随着温度的降低、 $[\text{Si}]$ 、 $[\text{C}]$  含量升高,平衡硫含量呈降低趋势;因此,选择

表 1 铁水中主要元素相互作用系数

Table 1 Interaction coefficient of main elements in molten iron

$e_i^j$	C	Si	Mn	S	P
$e_C^j$	0.14	0.08	-0.012	0.046	0.051
$e_{Si}^j$	0.18	0.11	0.002	0.56	0.11
$e_S^j$	0.11	0.063	-0.026	-0.028	0.029

表 2 铁水中碳、硅元素对平衡硫的影响

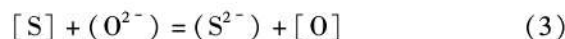
Table 2 Effect of carbon and silicon in molten iron on equilibrium sulfur

温度/ $^\circ\text{C}$	平衡 $[\text{S}]/10^{-6}$ (铁水 Mn=0.20%、S=0.035%、P=0.115%)			
	Si=0.30%, C=4.50%	Si=0.40%, C=4.50%	Si=0.50%, C=4.50%	Si=0.30%, C=4.00%
1 200	0.06	0.05	0.04	0.07
1 300	0.21	0.18	0.15	0.26
1 400	0.66	0.56	0.49	0.83
1 500	1.84	1.55	1.35	2.31

合适的铁水成分、温度创造良好热力学条件,在此基础上,改善动力学条件,KR 可以快速深脱硫。

### 1.2 转炉脱硫

根据熔渣离子理论,氧气顶吹转炉脱硫反应、平衡常数( $k_2$ )、硫在渣-钢间分配系数( $L_s$ )分别见式(3)<sup>[10]</sup>、式(4)<sup>[10]</sup>及式(5)<sup>[11]</sup>。



$$k_2 = a_{(\text{S}^{2-})} \times a_{(\text{O})} / [a_{(\text{O}^{2-})} \times a_{(\text{S})}] \quad (4)$$

$$L_s = (\text{S}) / [\text{S}] = K_2 \times (N_{\text{O}_2} \times \gamma_{\text{O}_2} \times f_s) / (\gamma_{\text{S}^{2-}} \times f_o \times [\text{O}]) \quad (5)$$

脱硫影响因素如下:(1)碱度的影响。炉渣碱度高, $N_{\text{O}_2}$ -越大, $\gamma_{\text{S}^{2-}}$ -越小<sup>[10-11]</sup>, $L_s$  越高。脱硫是在钢渣界面进行反应的,在炼钢温度下,若炉渣碱度过高,炉渣粘度增大,增加 S 通过钢、渣界面的阻力,将降低脱硫产物( $\text{S}^{2-}$ )离开反应区的扩散速度,因此,在提高碱度的同时,须保证炉渣具有良好的流动性。

(2)终点氧含量影响。钢中  $[\text{O}]$  增大, $L_s$  则变小,因此降低钢水活度氧有利于脱硫。为保证炉渣既具有高碱度又有良好的流动性,渣中与  $[\text{O}]$  平衡的  $(\text{FeO})$  含量须适中。

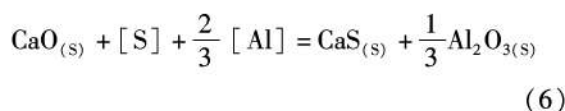
(3)终点温度的影响。反应式(3)是吸热量较小的反应<sup>[11]</sup>,温度对反应影响不大,对脱硫更重要的影响是高温能促进石灰的渣化,提高脱硫速度。

(4) $(\text{S}^{2-})$  的影响。降低  $(\text{S}^{2-})$  浓度有利于脱硫,因此增大渣量、降低入炉铁水、炉料含硫量可降低  $(\text{S}^{2-})$  浓度,对脱硫有利。

(5)加强钢、渣搅拌,扩大反应界面。

### 1.3 RH 脱硫

硅钢冶炼时,RH 喷粉脱硫存在的主要脱硫反应见式(6)<sup>[12]</sup>。



$$\lg k_3 = \frac{15\,295.68}{T} - 5.26 \quad (7)$$

表 3 为钢水中主要元素相互作用系数<sup>[13]</sup>,由其可计算不同硅钢成分条件下的铝、硫活度系数,结合脱硫反应平衡常数式(7)<sup>[12]</sup>,热力学上可以定量地知道各反应能达到的最大脱硫限度,1 560  $^\circ\text{C}$  下,对应表 4 典型钢水成分,活度系数  $f_s = 1.55$ , $f_{\text{Al}} = 1.54$ ,1 560  $^\circ\text{C}$  平衡硫含量为  $4.8 \times 10^{-6}$ ;1 570  $^\circ\text{C}$  平衡硫含量为  $5.4 \times 10^{-6}$ ;因此,对高铝低氧钢水而

表 3 钢水中主要元素相互作用系数

Table 3 Interaction coefficient of main elements in molten steel

$e_i^j$	S	Si	Al	Mn	C	P	O
$e_S^S$	-0.028	0.065	0.022	-0.017	0.290	0.042	0
$e_{Si}^S$	0.057	0.080	0.059	0.280	0.240	0.085	-0.280
$e_{Al}^S$	0.017	0.055	0.045	0.035	0.130	0.048	-6.590

表 4 高牌号无取向硅钢 W310 典型成分/%

Table 4 Typical composition of high grade non oriented silicon steel W310/%

C	Si	Mn	P	S	Al	O
0.002 0	2.70	0.20	0.015	0.002 0	0.75	0.000 2

表 5 主要试验设备参数

Table 5 Main test equipment parameters

KR		转炉		RH	
脱硫方式	机械搅拌	公称容量/t	300	公称容量/t	300
额定处理量/t	270~320	额定出钢量/t	270~320	额定处理量/t	270~320
搅拌速度/( $r \cdot \min^{-1}$ )	75~120	供氧强度/ $m^3 \cdot t^{-1} \cdot \min^{-1}$	3.2~3.7	脱硫方式	顶喷粉
加料速度/( $kg \cdot \min^{-1}$ )	最大 1400	底吹强度/ $m^3 \cdot t^{-1} \cdot \min^{-1}$	0.03~0.20	浸渍管内径/mm	750
铁水罐最大容量/t	320	挡渣方式	挡渣镖、气动	极限真空度/Pa	20

(1) 选择合适温度、成分的铁水,为脱硫创造良好的热力学条件。前述分析表明,硫的平衡值主要取决于 $[Si]$ 参与下的脱硫反应,基于热力学视角,随着温度的降低, $[Si]$ 、 $[C]$ 含量升高,平衡硫含量呈降低趋势;从动力学来看,高温有利于传质,因此深脱硫时在工艺上须选择合适的铁水温度。根据高炉铁水状况,确定铁水理化特性目标窗口为: $[Si]$  0.30%~0.60%, $[S] \leq 0.030\%$ , $[C] > 4.00\%$ ,铁水温度 1300~1450℃,其平衡硫含量 $\leq 2.31 \times 10^{-6}$ 。

(2) 调整脱硫剂成分,促进传质。在脱硫反应过程中,石灰颗粒表面将形成致密的 $Ca_2SiO_4$ 与CaS反应层,导致硫向石灰内部扩散成为脱硫的限制性环节,萤石含量由 7.0%左右提高到 10.0%,增大共晶熔体含量,达到消解 $Ca_2SiO_4$ 与CaS的作用<sup>[14]</sup>,促进传质。

(3) 改善动力学条件。提高 KR 搅拌速度由 90~100 r/min 提高到 100~110 r/min,搅拌时间 10~13 min。

### 2.2.2 转炉冶炼

(1) 废钢比 8.0%~15.0%,根据铁水硅含量、温度等显著影响转炉热平衡因子,对入炉废钢进行动态调整,避免终点钢水氧含量过高而导致 $L_s$ 降低。

(2) 造渣。在提高碱度增加 $L_s$ 的同时,兼顾炉渣流动性,确定 $R = 3.5 \sim 4.0$ ,MgO 含量 5.0%~

言,改善 RH 动力学条件是实现超低硫冶炼的关键。

## 2 超低硫冶炼工艺试验

通过冶炼过程脱硫热力学计算等理论分析,确定了其影响因素,结合冶金过程特点及主要工艺装备,制定 W310 超低硫生产工艺与措施如下:

### 2.1 主要试验设备

试验装备由 KR 铁水脱硫站、顶底复吹转炉、RH 脱气等组成,主要参数见表 5。

### 2.2 超低硫冶炼工艺

#### 2.2.1 铁水处理

7.0%。

(3) 强底吹应用,降低钢水氧含量,提高 $L_s$ 。前期底吹强度 $0.06 \sim 0.08 m^3 \cdot t^{-1} \cdot \min^{-1}$ ,脱碳期底吹强度 $0.03 \sim 0.05 m^3 \cdot t^{-1} \cdot \min^{-1}$ ,副枪 TSC 探头测温后底吹强度 $0.15 \sim 0.20 m^3 \cdot t^{-1} \cdot \min^{-1}$ ,促进渣、钢间的反应平衡<sup>[15]</sup>。

(4) 转炉终点控制。兼顾温度、活度氧对炉渣传质及 $L_s$ 影响,转炉终点温度 1 645~1 660℃,氧含量 0.040%~0.070%;转炉终点目标 $S \leq 0.003 0\%$ 。

(5) 挡渣。采用“挡渣帽+挡渣镖+气动挡渣”相结合的复合挡渣工艺,降低钢包渣中氧含量,为 RH 脱硫处理创造良好条件。

#### 2.2.3 RH 真空处理

(1) 调整脱硫剂成分,促进传质。常用的钢液脱硫粉剂主要有 CaO-CaF<sub>2</sub>、CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 等,CaO-CaF<sub>2</sub> 渣系熔点低、脱硫能力最强<sup>[16]</sup>;CaO-CaF<sub>2</sub> 二元系在质量比 7:3 条件下,既能兼顾耐材寿命又能保证脱硫效率<sup>[17]</sup>,新工艺选用其替代原 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 脱硫剂。

(2) 提高真空度,提升气体流量。促进钢水循环量增加,改善动力学条件。加强合金化及脱硫期的搅拌,处理过程提升气体及真空度控制见图 1。

(3) RH 脱碳结束,加铝、硅脱氧合金化。合金化后高铝低氧位下进行喷吹脱硫作业,喷粉速度 100~120 kg/min。

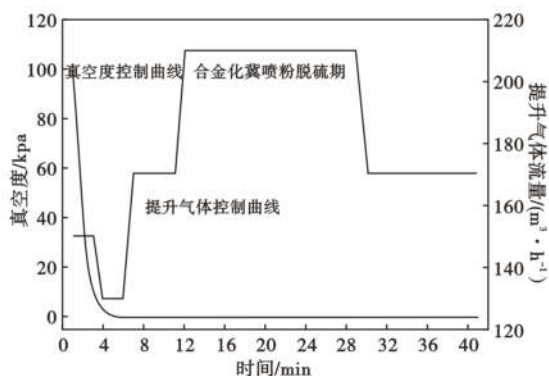


图 1 提升气体流量及真空度控制曲线

Fig. 1 Lift gas flow and vacuum control curves

### 2.2.4 硫负荷控制

对进入系统的硫元素、硫化钙等化合物进行控制,具体如下:

(1) KR 处理结束  $S \leq 15 \times 10^{-6}$ , 脱硫渣扒净度  $> 90\%$ 。

(2) 采用低硫废钢、造渣料。

(3) 转炉洗炉。转炉生产高牌号无取向硅钢的前一炉, 转炉开始采用低硫冶炼模式, 采用低硫废钢冶炼, 入炉铁水  $S \leq 20 \times 10^{-6}$ , 终点硫  $\leq 70 \times 10^{-6}$ , 出钢结束后, 炉渣翻空。

(4) 钢包管理。采用低硫污染的清洁钢包, 钢包内无残钢、残渣。

(5) RH 生产准备。高牌号无取向硅钢生产前, RH 生产一组低碳、低硫钢种对真空槽进行清洗, 避免槽体含硫残钢、挂渣等对钢液的污染。

## 3 结果与讨论

### 3.1 KR-RH 冶炼过程硫的变化

生产过程中分别在 KR 出站、转炉主吹 (TSC 样, 碳约 0.30%)、转炉终点 (TSO 样, 碳约 0.03%)、RH 处理前、后取样并分析硫元素含量, 各阶段硫元素平均值的变化趋势见图 2、表 6, 总体而言, 优化前、后硫元素变化趋势虽基本相同, 但优化后转炉、RH 终点硫含量则明显降低。

铁水脱硫处理后的低硫铁水兑入转炉炼钢, 转炉主吹、吹炼终点的钢水均有不同程度的回硫现象, 这是因为铁水中残留脱硫渣、废钢、石灰等渣料中的硫在炼钢过程中进入钢水, 吹炼过程转炉脱硫量低于炉料增硫量所致。转炉主吹后硫下降的主要原因有二, 其一主吹温度  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右, 终点温度约  $1650\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 转炉脱硫是吸热反应, 高温有利于脱硫; 其二随着温度升高, 碳含量降低, 炉渣氧化性增强, 粘度降低、流动性变好, 降低了硫通过钢、渣界面的

阻力, 增加脱硫产物 ( $\text{S}^{2-}$ ) 离开反应区的扩散速度, 脱硫动力学条件向好, 这也说明了在实际生产过程中, 炉渣的碱度、(FeO) 含量对脱硫具有双重作用, 须有合适的含量, 这与前述转炉脱硫影响因素分析吻合。

RH 进站取样表明, 同转炉终点比较, 优化前硫含量增加  $2.79 \times 10^{-6}$ , 优化后基本相当, 增硫的原因应为钢包残渣氧化性增强, 使脱硫的热力学条件恶化, 造成回硫, 经 RH 喷粉脱硫处理后, 硫含量下降明显。

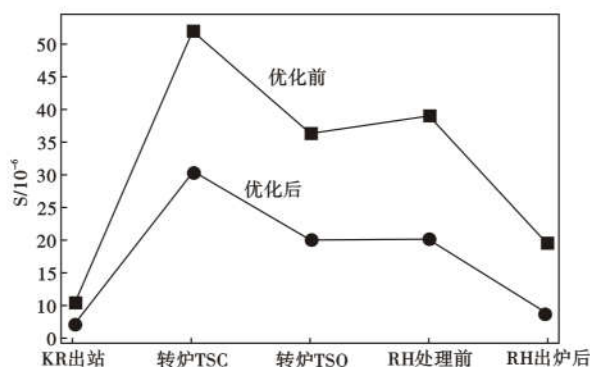


图 2 优化前后冶炼过程钢中硫含量变化

Fig. 2 Change of sulfur content in steel in smelting process before and after optimization

表 6 优化前后钢中硫含量变化规律

Table 6 Variation law of sulfur content in steel before and after optimization

取样时机	硫含量/ $\times 10^{-6}$		增硫量/ $\times 10^{-6}$	
	优化前	优化后	优化前	优化后
KR	10.48	7.07		
转炉主吹 TSC	52.03	30.60	41.55	23.53
转炉终点 TSO	36.42	20.10	25.94	13.03
RH 处理前	39.21	20.12	2.79	0.02
RH 处理后	19.50	8.65		

### 3.2 KR 脱硫效果

183 炉平均终点硫含量  $7.07 \times 10^{-6}$ , 一次处理合格率 100% ( $S < 15 \times 10^{-6}$ ), 生产过程控制稳定, 硫分布如图 3 所示。

生产过程中, 对 W310 硅钢冶炼铁水按试验目标窗口要求进行了择优分配,  $[\text{C}]$ 、 $[\text{Si}]$ 、 $[\text{S}]$  平均值分别为 4.45%、0.38%、0.025%, 铁水处理前、后平均温度分别为  $1368\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1335\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 结合搅拌参数优化等改善动力学措施, 一次处理后硫含量下降到  $7.07 \times 10^{-6}$ , 合格率由 69% 提升到 100%。

### 3.3 转炉冶炼终点硫

试验 162 炉转炉终点平均硫含量  $20.10 \times 10^{-6}$ ,

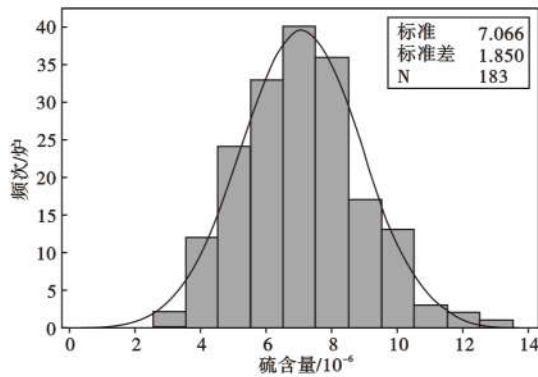


图 3 KR 出站铁水中硫含量分布

Fig. 3 Distribution of sulfur content in hot metal after KR

较优化前降低 44.8%；终渣硫平均含量  $200.0 \times 10^{-6}$ ，硫在渣、钢间的分配比  $L_s = 9.95$ ；过程回硫  $13.03 \times 10^{-6}$ ，较优化前降低 49.8%，总体控制较好，转炉终点 S 含量及终渣情况见表 6、表 7，样本数为 29 个。

### 3.4 转炉硫负荷

对造渣料、铁水、渣样、钢水等进行取样分析，根据投入、产出物料量，以炉为单位对硫平衡进行了计算，表 8 是 6 炉计算结果，造渣料、废钢、脱硫渣所带入的硫占炉料中总硫量比例分别为 34.74%、27.02%、25.28%，三者带入硫占炉料总负荷的 87%

表 7 转炉终渣成分和碱度

Table 7 Final slag composition and basicity of BOF

项目	渣成分/%								R(碱度)
	T. Fe	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MnO	MgO	S	
均值	16.52	12.9	2.59	2.73	48.5	2.14	6.15	0.02	3.76
标准差	1.51	1.12	0.23	0.23	2.18	0.32	0.73	0.005	0.29

左右，是造成转炉增硫的主要因素。入炉铁水温度、硅含量过高，使废钢、造渣料用量随之大幅增加，因此对铁水温度、成分管控十分必要。

文献[10]提出，氧气转炉在吹炼过程有气化脱硫出现，除去的硫含量 10%~20%，本研究最大脱硫量 13.77%，与文献基本相当。

表 8 转炉硫的物料平衡

Table 8 Material balance of sulfur in converter

项目	收入		支出		
	kg/炉	S/%	kg/炉	S/%	
铁水中硫	2.01	12.96	钢水中硫	6.41	41.20
废钢中硫	4.20	27.02	渣中硫	7.00	45.03
造渣料中硫	5.40	34.74	气化及其它	2.14	13.77
脱硫渣带入	3.93	25.28			
总计	15.54		总计	15.54	

### 3.5 RH 终点硫及脱硫率

162 炉 RH 终点平均温度 1559℃，硫含量  $8.65 \times 10^{-6}$ ，脱硫率由 50.3% 提高至 57.0%；喷粉量 455kg/炉，降低 55.9%；数据详见表 9。

在 RH 精炼过程中，脱硫反应在钢包顶渣-钢水、粉剂-钢水间进行，喷粉条件下硫的传质比通常钢渣接触时要大得多，脱硫主要取决于粉剂-钢水间反应<sup>[18]</sup>。铝、硅铁等主要合金元素加入后，脱硫前钢液已予充分脱氧，具有足够低的氧位，同时顶喷粉剂贯穿钢水表面，增大了粒子和钢水间反应界面积；优化后合金化及脱硫期提升气体流量由 170 m<sup>3</sup>/h 增加到 210 m<sup>3</sup>/h，加强对钢液的搅拌，促进喷入粉

剂在钢液内的弥散，进一步增大传质速率，脱硫操作进行顺利。

优化后脱硫剂用量大幅减少，原因有三，其一，CaO-CaF<sub>2</sub> 渣系脱硫能力较 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 强；其二，强化喷粉操作，有利于提高脱硫剂的有效利用率<sup>[18]</sup>；其三，在喷吹参数和喷粉量既定时，提高提升气体流量，增大钢液的循环流量有利于加速脱硫<sup>[18]</sup>。

表 9 优化前后 RH 脱硫数据

Table 9 Data of RH desulfurization before and after optimization

工艺	样本数	喷粉前	喷粉后	喷粉量/kg	脱硫率/%	<25 × 10 <sup>-6</sup> 炉次比例/%
		S/%	S/%			
优化前	153	39.21	19.50	1032	50.3	90.5
优化后	162	20.12	8.65	455	57.0	100.0

## 4 结论

(1) 热力学计算表明，铁水温度 1200~1500℃，[Si]0.30%~0.50%、[C]4.0%~4.50% 条件下，KR 脱硫反应平衡硫含量极低，良好的动力学条件是实现超低硫的关键；试验生产中，冶炼铁水按此目标窗口要求进行了择优分配，结合搅拌参数优化等改善动力学措施，处理后硫含量由  $10.48 \times 10^{-6}$  下降到  $7.07 \times 10^{-6}$ ，一次处理合格率由 69% 提升到 100%。

(2) 转炉采取入炉硫负荷管控、热平衡、底吹强搅及活度氧、温度控制等措施，构建低碳氧积冶炼技术，为转炉脱硫创造较好的热力学、动力学条件，优

化后转炉终点平均硫含量为  $20.10 \times 10^{-6}$ 、过程回硫  $13.03 \times 10^{-6}$ ，较优化前分别降低 44.8%、49.8%。

(3) 造渣料、废钢、脱硫渣所带入的硫是造成转炉回硫的主要因素；硫在渣、钢间分配比达 9.95，转炉中气化脱硫约 13.77%。

(4) 对高牌号无取向硅钢 W310 而言，在前工序协同管控硫的基础上，改善 RH 动力学条件是实现

超低硫冶炼的关键。通过 RH 脱硫剂成分调整，提高真空度、增加提升气体流量改善动力学条件及强化喷粉操作，RH 工序钢水脱硫率平均由 50.3% 提高到 57.0%；喷粉量 455 kg/炉，降低 55.9%。

(5) 基于冶炼过程脱硫热力学计算及理论分析，确定了其影响因素，结合冶金过程特点，系统制定超低硫硅钢的生产工艺，W310 钢水硫含量由  $19.50 \times 10^{-6}$  降至  $8.65 \times 10^{-6}$ ，取得了良好的效果。

参考文献

[1]何忠治,赵宇,罗海文.电工钢[M].北京:冶金工业出版社,2012:1-10.

[2]薛利强,潘振东,吕令涛,等.超高牌号无取向硅钢降钛工艺研究及改进[J].中国冶金,2020,30(10):60-64.

[3]曾建华,潘红,冯远超,等.无取向电工钢硫含量控制技术[J].炼钢,2013,29(1):32-35.

[4]高振宇,陈春梅,李雷,等.Ti,S元素对高牌号无取向硅钢析出物的影响[J].电工钢,2021,3(6):13-18.

[5]程林,庞伟光,刘珍童,等.杂质元素对无取向硅钢性能的影响与控制工艺研究[J].金属材料与冶金工程,2019,1:43-48.

[6]吕学钧,张峰,王波,等.夹杂物对无取向硅钢磁性能的影响[J].特殊钢,2012,33(4):22-25.

[7]秦哲,廖建军,周剑峰,等.高牌号无取向电工钢 RH 深脱硫[J].钢铁,2014,49(2):40-44.

[8]王惠斌.铁水脱硫的理论分析[J].特殊钢,1983,4(4):1-12.

[9]许家彦.超低硫管线钢冶炼技术基础研究[D].沈阳:东北大学,2005:33-34.

[10]黄希祐.钢铁冶金原理[M].第2版.北京:冶金工业出版社,1990:184-211.

[11]陈家祥.钢铁冶金学[M].北京:冶金工业出版社,1990:115-117.

[12]赵沛,成国光.炉外精炼及铁水预处理实用技术手册[M].北京:冶金工业出版社,2004:63-65.

[13]区铁.钢水真空环流与二次精炼反应的研究[D].北京:北京科技大学,2000:69-71.

[14]徐峰,徐安军,张茂林,等.KR法铁水脱硫的物理化学[C].第十四届全国炼钢学术会议论文集,重庆:中国金属学会炼钢分会,2006:25-29.

[15]杨利彬,曾加庆,邓勇,等.大型转炉高效率、长寿命顶底复合吹炼技术[J].钢铁,2020,55(4):47-49.

[16]胡汉涛.钢液 RH 精炼非平衡脱碳过程的数学模拟[D].上海:上海大学,2005:13-17.

[17]区铁,周国治,刘建功,等.RH法的脱碳及脱硫速率[J].炼钢,2000,16(2):57-62.

[18]魏季和,朱守军,郁能文.钢液 RH 精炼中喷粉脱硫的动力学[J].金属学报,1998,34(5):497-505.

关于认准《特殊钢》网址、防范假冒网站的声明

《特殊钢》杂志由中信泰富特钢集团旗下大冶特殊钢有限公司主管和主办，由《特殊钢》编辑部负责运营，是全国特殊钢行业知名的综合性科技刊物（双月刊）；《特殊钢》杂志于 1980 年创刊发行，国际标准刊号为 ISSN1003-8620，国内统一刊号为 CN42-1243/TF。

近期，编辑部发现网络上存在大量假冒《特殊钢》杂志的网页，为维护我刊良好声誉和广大作者、读者的权益，本社郑重声明如下：

(一) www. specialsteeljournal. com 为《特殊钢》杂志的唯一网址，备案号为鄂 ICP 备 2022000839 号，请广大作者、读者使用《特殊钢》网址进行投稿、订阅、论文免费下载等操作。

(二) 除维普、万方、知网为本社授权合作网站，具有数字化复制权、发行权、汇编权、翻译权、信息网络传播权、版式设计专有权，其余网站皆未经本社授权，无权从事相关内容的刊登、收费阅读，承揽稿件，承接广告等行为，请广大作者、读者提高警惕，注意甄别，谨防受骗，由此造成的一切损失和后果，本编辑部不承担任何经济 and 法律责任；同时也鼓励向本编辑部进行举报相关侵权线索。

(三) 未经授权网站请于 2022 年 3 月 31 日前自行将与《特殊钢》杂志相关的内容撤除，逾期仍存在涉嫌侵害著作权、名誉权的单位或个人，本编辑部保留进一步发函、举报、诉讼等法律手段进行维权，必要时上报公安机关依法追究刑事责任。

《特殊钢》编辑部