

## 80 t BOF-LF-RH 流程 GCr15 钢超深脱硫的生产实践

赵世杰<sup>1,2</sup> 轩振博<sup>3</sup> 冯文甫<sup>1,2</sup> 刘学强<sup>1,2</sup> 范建英<sup>1,2</sup> 霍立国<sup>1,2</sup>

(1 邢台钢铁有限责任公司炼钢厂, 邢台 054027; 2 河北省线材工程技术研究中心, 邢台 054027; 3 天津冶金集团轧三钢铁有限公司, 天津 301606)

**摘要** 通过实践表明,生产轴承钢时,转炉出钢温度 $\geq 1650\text{ }^\circ\text{C}$ 、出钢 $[\text{O}] \leq 300 \times 10^{-6}$ , 18 kg/t的渣料可实现出钢过程50%的脱硫效率;同时,转炉出钢采用“挡渣锥+滑板挡渣”双挡的模式,实现将硫再降低0.0005%;采取“铝在转炉出钢时加入+LF精炼使用硅铁粉脱氧”模式,以及控制炉渣二元碱度在5~6,可实现50%以上的脱硫效率的同时,也能够稳定浇铸性能,达到成品硫 $\leq 0.0015\%$ 。

**关键词** 轴承钢 脱硫 精炼 生产实践

## Production Practice of Ultra Deep Desulphurization of Steel GCr15 by 80 t BOF-LF-RH Process

Zhao Shijie<sup>1,2</sup>, Xuan Zhenbo<sup>3</sup>, Feng Wenfu<sup>1,2</sup>, Liu Xueqiang<sup>1,2</sup>, Fan Jianying<sup>1,2</sup>, Huo Ligu<sup>1,2</sup>

(1 Steelmaking Plant, Xingtai Iron & Steel Corp. Ltd, Xingtai 054027; 2 Heibei Engineering Research Center for Wire and Rod, Xingtai 054027; 3 Tianjin Metallurgical Group No. 3 Steel Rolling Co Ltd, Tianjin 301606)

**Abstract** Through the practice show that, it can be seen the production of bearing steel, the converter tapping temperature  $\geq 1650\text{ }^\circ\text{C}$ , tapping oxygen  $\leq 300 \times 10^{-6}$ , and 18 kg/t slag can achieve 50% desulfurization efficiency in the tapping process. At the same time, the mode of “slag retaining cone + slide plate slag retaining” is adopted in converter tapping to reduce sulfur by another 0.0005%; the mode of aluminum adding in BOF tapping + LF refining to deoxidize with ferrosilicon powder and controlling the binary basicity of slag to be 5~6 can achieve more than 50% desulfurization effect and stabilize the casting performance to get finished product sulfur content  $\leq 0.0015\%$ .

**Material Index** Bearing Steel, Desulphurization, Refine, Production Practice

轴承钢中硫作为有害元素,不仅引起钢的热脆,还会增加表面裂纹,引发氢质裂纹、硫化物应力腐蚀,造成韧性下降。鉴于此,用户对硫含量的要求更为严格,各钢铁企业也更为重视对硫含量的控制,逐步采用超深脱硫工艺。本文主要阐述邢台钢铁有限责任公司(下称邢钢)生产轴承钢时,通过制定全流程的超深脱硫工艺,实现成品硫含量稳定控制在 $\leq 0.0015\%$ 。

### 1 轴承钢生产工艺及现状

#### 1.1 轴承钢生产工艺

邢钢生产 GCr15 轴承钢(如表1)时采用“铁水脱硫 $\rightarrow$ BOF $\rightarrow$ LF $\rightarrow$ RH $\rightarrow$ CCM”工艺。铁水脱硫采用喷吹颗粒镁,处理完毕硫含量控制在 $\leq 0.010\%$ ,为避免炉渣回硫需要扒除炉渣;80 t 炉底复吹转炉,具有滑板挡渣、下渣检测等设备,可有效控制下渣量,并通过合金化、加入合成渣等实现出钢过程预脱硫;双工位 LF,采用双底吹钢包可实现底吹氩气灵活调节;RH 采用蒸汽真空泵,纯处理时间可满足 $\geq 30\text{ min}$ ;连铸机为4机4流280 mm $\times$ 325 mm断面,

并有轻压下等设备。

统计各工序节点的硫含量,如表2所示。随着冶炼流程的进行,硫含量呈下降趋势,成品硫含量为0.004%~0.006%。

#### 1.2 轴承钢深脱硫

在炼钢生产过程中,主要采取“高温、高碱度、大渣量、低氧化性”以及良好的动力学条件共同作用完成钢液脱硫<sup>[1,2]</sup>。在此模式下,除帘线钢、不锈钢等硅镇静钢外,其余钢种均在 LF 精炼环节完成脱硫任务,并且大多采用铝脱氧、高碱度渣的工艺,

表1 GCr15钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel GCr15 / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti
0.95 ~ 1.05	0.15 ~ 0.35	0.25 ~ 0.45	$\leq 0.020$	$\leq 0.015$	1.40 ~ 1.65	$\leq 0.005$

表2 各工序硫含量/%

Table 2 Sulfur content of each process / %

脱硫铁水	转炉终点	LF进站	LF离站	RH离站	出连铸机
0.009 ~ 0.013	0.008 ~ 0.010	0.006 ~ 0.008	0.004 ~ 0.006	0.004 ~ 0.006	0.004 ~ 0.006

但是需要在精炼结束前进行钙处理,将  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等高熔点变性成低熔点混合物,防止浇铸过程中析出聚集在塞棒、水口导致不能连续浇铸。钙处理后将会形成大颗粒夹杂物,对于轴承钢特殊的使用环境来说存在严重的隐患,因此国标要求轴承钢生产过程中禁止使用钙处理工艺<sup>[3]</sup>。

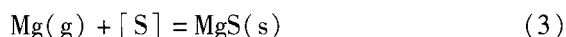
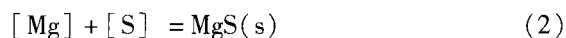
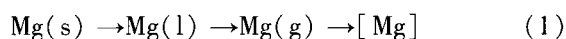
针对各种条件的限制和要求,邢钢通过近几年的摸索,采取管控原料、强化出钢、控制渣系等措施实现轴承钢超低硫的稳定生产,并连续稳定浇铸达 30 炉。

## 2 轴承钢超深脱硫过程控制

### 2.1 原料

#### 2.1.1 脱硫铁水

喷吹颗粒镁脱硫利用氮气作为载体将钝化颗粒镁,由喷枪喷入到铁水中,依托氮气、颗粒镁气化膨胀等搅拌作用,使喷吹气体、脱硫剂和铁水三者之间充分混合进行脱硫,如反应式(1~3)所示<sup>[4]</sup>。



较低的铁水温度降低反应速率,需要在铁水脱硫期间加快铁水包的周转、取消铁水包加废钢、减少处理前等待等减少铁水温度损失;同时根据高炉铁水硫含量,调整相应的喷吹速率(表3),可将异常铁水的终点硫稳定控制在 0.010% 以下。

在脱硫完毕后为保证扒渣效果,扒渣时加入聚渣剂 1 kg/t(50%~80%  $\text{SiO}_2$ , 粒度 0.2~3 mm)使炉渣快速结壳,不仅可缩短扒渣时间 1~2 min,同时扒渣率可提高到 95% 以上。

#### 2.1.2 废钢和渣料中硫元素控制

在炼钢过程中,硫元素另一来源就是由废钢和渣料中带入,需要对原料的硫含量进行特殊处理。综合转炉脱硫效率以及加入总量、钢渣平衡等,将原料 S 含量控制在  $\leq 0.030\%$ 。

### 2.2 转炉工序

参照脱硫热力学条件,转炉终点硫含量均在 0.010% 时的 4 种不同工况下(表4)各抽取 10 炉进

表3 不同硫含量铁水的脱硫工艺

Table 3 Desulphurization process of different sulfur content in hot metal

高炉铁水 S 含量/ %	颗粒镁喷吹速度/ ( $\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$ )	颗粒镁用量/ ( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )
$\leq 0.040$	2.0~2.2	0.9~1.1
0.040~0.060	2.2~2.6	1.2~1.5
0.060~0.080	2.5~3.0	1.5~2.0

表4 转炉不同工况条件钢中硫含量

Table 4 Sulfur content in steel with BOF different working conditions

工况	出钢温度/ °C	出钢氧/ $10^{-6}$	出钢加渣料/ ( $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ )	进 LF 硫含量/ %
A	1 600	400	15	0.008 0
B	1 600	300	18	0.007 0
C	1 650	400	20	0.006 5
D	1 650	300	18	0.005 5

行对比,工况 D 下进 LF 中 S 含量控制较好。另外,采用“挡渣锥+滑板挡渣”双挡的模式,更加利于减少出钢末期的带渣量,降低炉渣的氧化性,出钢过程及早成渣,据此可将硫再降低 0.000 5%。

### 2.3 钢水精炼过程

当钢液中的硫含量脱至 0.005% 以下时,继续进行深脱硫将变得越来越困难。但是,伴随着 LF 精炼技术的发展,可以有效解决钢种深脱硫问题<sup>[5]</sup>。在轴承钢深脱硫过程中,除了做好脱硫外还需兼顾无钙处理下较好的浇铸性能。

#### 2.3.1 炉渣碱度

在精炼工艺中为实现较好脱氧效果,炉渣二元碱度需控制在 15 以上。较高的碱度需要补充加入  $\text{Al}_2\text{O}_3$  渣料量降低炉渣至  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  三元渣系低熔点区;同时需要额外增加钙处理工艺,将脱氧过程中产生的高熔点夹杂物变性为以  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  为主的低熔点夹杂物,提高浇铸性能。

轴承钢生产过程中严格禁止钙处理。针对此,邢钢在生产轴承钢过程中为消除高熔点物质对浇铸性能的影响,采取降低 LF 炉渣碱度的处理工艺。该工艺下,炉渣的二元碱度为 3~4,各组分的控制范围为 40%~45% ( $\text{CaO}$ ), 12%~15% ( $\text{SiO}_2$ ), 18%~22% ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 如表 5 所示。但是,较低的碱度将导致脱硫效率大幅度下降。成品硫含量不能满足轴承钢超低硫的要求。

为满足轴承钢超低硫的控制,试验提高 LF 炉渣碱度、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的脱硫工艺。该操作下,LF 的炉渣二元碱度为 5~6,各组分的控制范围为 45%~55% ( $\text{CaO}$ ), 8%~12% ( $\text{SiO}_2$ ), 20%~25% ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 同时配加使用活度在 380 ml/4N-HCl 以上石灰,用以提高 LF 的脱硫效率。在该工艺下,从夹杂物的个

表5 不同工艺下 LF 炉渣组成

Table 5 Slag components of LF with different processes

工艺	炉渣组成 / %			二元碱度 (R)
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
正常工艺 LF 炉渣	40~45	12~15	18~22	3~4
脱硫工艺 LF 炉渣	45~55	8~12	20~25	5~6

表 6 不同脱硫工艺下 LF 钢中夹杂物粒径分布

Table 6 Particle size distribution of inclusions in LF steel with different desulphurization processes

工艺	夹杂物个数/(个·100 mm <sup>-2</sup> )		100 mm <sup>-2</sup> 夹杂物总个数
	3~8 μm	8~13 μm	
正常工艺 LF 炉渣	40	20	60
脱硫工艺 LF 炉渣	41	18	59

表 7 不同脱硫工艺下 LF 钢水夹杂物成分分类/(个·100 mm<sup>-2</sup>)

Table 7 Classification of inclusions in LF steel with different desulphurization processes/(pice·100 mm<sup>-2</sup>)

工艺	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·CaO	MgO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·CaO	MgO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·CaO·SiO <sub>2</sub>
正常工艺 LF 炉渣	4	6	5
脱硫工艺 LF 炉渣	3	7	4

数、尺寸,组成成分等统计来看,未发生较大变化,如表 6、7 所示。相比之下,LF 新渣系脱硫效率得到提升,较原工艺硫含量降低 0.001 0%~0.002 0%,稳定达到 0.003% 以下。

### 2.3.2 脱氧方式

为防止形成大量的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂,要严格控制铝的加入量和钢水中的 Al 含量<sup>[6]</sup>,并且铝只能在转炉出钢时加入,以实现 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 有充足的时间被炉渣吸附。在此之下,试验采用硅铁粉(含 75% Si、粒度 0.5~1 mm)进行补充复合脱氧,加入 9~10 kg/t 时的钢液溶解氧可控制在 5×10<sup>-6</sup>(如图 1)。

表 8 脱硫工艺过程硫含量对比/%

Table 8 Comparison of sulfur content in desulphurization process/%

工艺	铁水预处理	转炉终点	LF 进站	LF 离站	RH 离站	成品
正常工艺	0.010~0.012	0.008~0.010	0.006~0.008	0.004~0.006	0.004~0.006	0.004~0.006
深脱硫工艺	0.009~0.010	0.008~0.009	0.004~0.006	0.002 0~0.002 5	≤0.001 5	≤0.001 5

个流程均做了调整,实现成品硫稳定控制在 0.001 5% 以下,如表 8 所示,同时无钙处理下实现钢液的稳定浇铸。

### 4 结论

(1) 在铁水硫一致时,转炉出钢温度 ≥ 1 650 ℃、出钢氧 ≤ 300×10<sup>-6</sup>,18 kg/t 的渣料可实现出钢过程 50% 的脱硫效率。同时转炉出钢时采用“挡渣锥+滑板挡渣”双档的模式,实现将硫再降低 0.000 5%。

(2) 采取“转炉出钢时加铝+LF 使用硅铁粉脱氧”模式,以及控制炉渣二元碱度 5.0~6.0,可实现 50% 以上的脱硫效果同时也能够稳定浇铸性能。

(3) 在 LF 离站前加入 0.5~1 kg/t 的萤石降低炉渣熔点,促进 RH 钢渣反应继续进行脱硫。

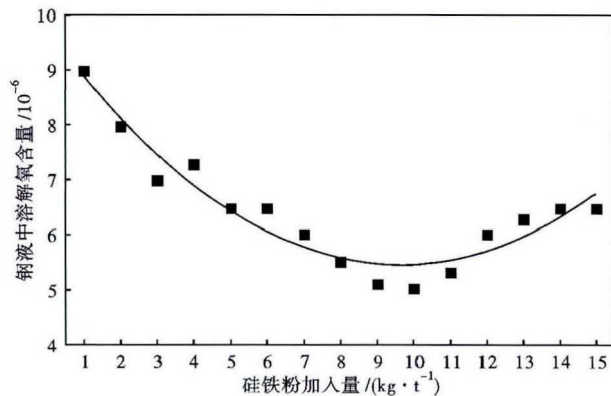


图 1 LF 中硅铁粉加入量与钢液溶解氧关系

Fig. 1 Relationship between amount of ferrosilicon powder added and dissolved oxygen of molten steel in LF

### 2.3.3 RH 脱硫

生产过程中钢液在钢包、RH 真空室内按照动力学方向循环,具有较好的动力学条件<sup>[7]</sup>。但是,受制于炉渣表面暴露时间长,以及高碱度渣系,钢液表面的炉渣容易凝固和结壳,影响钢渣继续脱硫。

在 LF 离站前加入 0.5~1 kg/t 的萤石降低炉渣熔点,以此来提高炉渣的流动性,充分利用 RH 较好的动力学条件,促进钢渣反应继续进行脱硫。在此条件下,脱硫量能够达到 0.000 5%。

### 3 轴承钢脱硫效果对比

结合生产工艺和流程,轴承钢深脱硫工艺从整

### 参考文献

- [1] 黄西祐. 钢铁冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社,2005.
- [2] 刘 浏. 超低硫钢生产工艺技术[J]. 特殊钢,2000,21(6):29-33.
- [3] 易 操,朱 荣,董 凯,等. GCr15 钢 LF 精炼渣系脱硫优化的研究[J]. 钢铁研究,2010,38(1):12-14,37.
- [4] 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.
- [5] 俞海明. 转炉钢水的炉外精炼技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [6] 刘佳伟,岳 峰,王子健. 100 t BOF-LF-RH-CC 流程冶炼 GCr15 轴承钢非金属夹杂的演变[J]. 特殊钢,2017,38(3):61-65.
- [7] 魏鹏远,姜 敏,杨 叠,等. 高速铁路车轴用 25CrMoVN 超低氧钢 RH 精炼过程非金属夹杂物的行为[J]. 特殊钢,2015,36(3):1-4.

赵世杰(1985-),男,工程师,内蒙古工业大学(本科)毕业,炼钢技术研究。E-mail:331665690@qq.com

收稿日期:2020-04-28