

# 高磁感取向硅钢炼钢生产实践

李志成, 赵 鸣, 徐 涛, 徐少华, 王俊刚, 韩浩田, 刘朋成

(内蒙古包钢稀土钢板材有限责任公司, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 稀土钢板材公司炼钢区域通过全产线工艺优化, 实现了高磁感取向硅钢冶炼过程中精确控制各类成分的目标。其中铸坯全氧质量分数控制在 0.000 4% ~ 0.001 5% 之间; 铝的质量分数控制在 0.027 0% ~ 0.030 0% 之间; 氮的质量分数控制在 0.007 1% ~ 0.008 3% 之间, 使高磁感取向硅钢满足下一步轧制工艺的需要, 实现了高磁感取向硅钢批量生产。

**关键词:** 取向硅钢; 生产工艺; 成分控制

中图分类号: TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2022)02-0005-03

## Production Practices on Steelmaking for High Magnetic Induction Oriented Silicon Steel

Li Zhi-cheng, Zhao Ming, Xu Tao, Xu Shao-hua, Wang Jun-gang,  
Han Hao-tian, Liu Peng-cheng

(Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth Steel Plate Co., Ltd., Baotou 014010,  
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** The goal of accurately controlling various components in smelting process of high magnetic induction oriented silicon steel is realized through process optimization of the whole production line in steelmaking area of Rare Earth Steel Plate Co., where the mass fraction of total oxygen in casting blank is controlled at 0.000 4% ~ 0.001 5%; mass fraction of aluminum is controlled at 0.027 0% ~ 0.030 0%; mass fraction of nitrogen is controlled at 0.007 1% ~ 0.008 3% so that the high magnetic induction oriented silicon steel could meet the needs of next step in the rolling process. As a result, its mass production is realized.

**Key words:** oriented silicon steel; production process; component control

高磁感取向硅钢(也称 Hi-B 钢)因具有优异的磁感强度、磁性能以及较低的铁损等优点,常被用于各种大中型电力变压器的制造。近年来,随着电力行业对特高压需求的发展,研究开发高性能的高磁感取向硅钢,对电力变压器满足现在的使用要求和未来发展意义重大<sup>[1]</sup>。

包钢稀土钢板材公司自 2020 年开始试制高磁

感取向硅钢,经过两次小批量生产,突破了炼钢环节多项技术瓶颈,2021 年炼钢生产线达到年产高磁感取向硅钢 4 万 t 的能力。

### 1 设备及工艺简介

#### 1.1 设备简介

稀土钢板材公司装配有 KR 铁水预处理装置

3 套,260 t 顶底复吹转炉 3 座,260 t RH 真空精炼炉 2 座,2 250 mm 与 1 650 mm 双流板坯连铸机各 1 台。冶炼区域主要设备及 1 650 mm 连铸机技术参数见表 1、表 2。

表 1 冶炼区域主要设备

主体设备	数量
KR 铁水预处理装置	3 套
260 t 顶底复吹转炉	3 座
260 t LF 钢包精炼炉	2 座
260 t RH 真空脱气炉	2 套

表 2 1 650 mm 连铸机主要技术参数

序号	项目	技术参数
1	连铸机机型	直结晶器连续弯曲连续 矫直弧型板坯连铸机
2	连铸机台数 × 流数	1 × 2
3	连铸机基本半径/m	10
4	流间距/m	6.5
5	浇注断面厚度/mm	230、250(预留)
6	宽度/mm	900 ~ 1 650
7	定尺长度/mm	8 000 ~ 11 000
8	铸机冶金长度/m	约 36
9	铸机速度范围 (m · min <sup>-1</sup> )	0.1 ~ 2.5
10	引锭杆装入方式	上装
11	结晶器铜板长度/mm	900
12	结晶器振动装置	液压振动
13	扇形段更换方式	吊具式扇形段更换装置
14	切割方式	在线火焰切割
15	铸坯去毛刺	在线去毛刺机
16	铸坯喷号	在线喷号机
17	出坯方式	横移车 + 辊道热送 + 推钢机/垛板台
18	出坯辊面标高/m	+0.93
19	浇注平台标高/m	+13.6

## 1.2 高磁感取向硅钢成分设计

经对国内外取向硅钢生产技术的调研及现场装备条件的分析,确定采用低温加热一次冷轧法生产 Hi - B 钢。该生产工艺成本低,性能好,产品的市场竞争力最强,代表取向硅钢领域当今世界的最高技术水平。采用该生产工艺,需要从炼钢工序

开始就对产品成分进行优化处理,其中最重要的是取向硅钢中抑制剂的选用及控制。经过对比分析,最终采用 AlN 为主抑制剂,同时添加少量的 Sn 作为辅助抑制剂<sup>[2-3]</sup>。

## 1.3 生产工艺简介

根据现有生产设备及高磁感取向硅钢成分设计特点,炼钢产线工艺流程设计为铁水预处理(KR 脱硫)→转炉冶炼→RH 精炼→1 650 mm 双流板坯连铸→热装。

在冶炼过程中成分控制难点有三个,即钢中硅铁合金加入量大,成分混匀速度慢,铝、氮的变化不稳定,随真空过程进行不断变化,部分成分设计范围窄,要求成分控制精度高。

## 2 生产工艺控制与实践

### 2.1 转炉冶炼工艺

转炉工序采用铁水与自产废钢冶炼,铁水入炉前经 KR 预处理,保证入炉铁水  $\omega[S] \leq 0.002\%$ 。转炉出钢后每吨钢加入铝铁 1.5 kg 进行预脱氧,随后加入合金化所需 90% 以上微碳硅铁进行合金化,同时加入锡锭配锡至目标。

### 2.2 RH 真空处理工艺

RH 真空处理采用以下处理模式进行真空循环。环流气全程采用氮气,流量为 260 m<sup>3</sup>/h。真空处理开始后加入 150 kg 氮化硅锰合金对钢水进行增氮操作,控制离位氮的质量分数目标范围至 0.006 5% ~ 0.007 5%。碳、硅、锰、硫、铝等成分按照目标含量分四次进行调整,保证离位命中成分控制范围。

### 2.3 连铸保护浇注

浇注过程采用全程保护浇注。中间包开浇前用氩气吹扫,并在中间包中充氩,避免了开浇过程钢水与空气的接触。板坯宽度 1 260 mm,浇注过程保证恒拉速,拉速稳定在 0.9 m/min。

## 3 工艺控制及效果

按照上述冶炼方案,冶炼某浇次高磁感取向硅钢共 13 炉。

### 3.1 成分控制

该浇次 13 炉取向硅钢成品成分见表 3。经过检验,该浇次 13 炉取向硅钢成分全部命中控制范围。

表3 中间包化学成分(质量分数)

熔炼号	C	Si	Mn	P	S	Als	Sn	O	N
212 XXX 42	0.056	3.13	0.102	0.014	0.007	0.027 4	0.039	0.000 6	0.007 7
212 XXX 43	0.055	3.20	0.101	0.015	0.006	0.027 2	0.041	0.000 8	0.007 5
212 XXX 44	0.056	3.16	0.094	0.014	0.007	0.029 2	0.040	0.000 8	0.007 1
212 XXX 46	0.055	3.20	0.098	0.013	0.007	0.029 2	0.038	0.000 8	0.007 6
212 XXX 47	0.055	3.23	0.098	0.011	0.006	0.029 4	0.040	0.000 7	0.007 6
212 XXX 49	0.054	3.20	0.100	0.013	0.007	0.028 0	0.041	0.000 4	0.007 3
212 XXX 50	0.057	3.34	0.099	0.012	0.007	0.027 7	0.038	0.000 5	0.008 2
212 XXX 52	0.057	3.26	0.101	0.014	0.006	0.028 3	0.039	0.000 6	0.007 2
212 XXX 53	0.052	3.36	0.100	0.012	0.006	0.027 1	0.040	0.001 4	0.007 8
212 XXX 54	0.052	3.27	0.100	0.010	0.006	0.026 3	0.042	0.000 5	0.007 1
212 XXX 55	0.051	3.19	0.098	0.012	0.005	0.027 1	0.039	0.000 7	0.007 4
212 XXX 57	0.056	3.27	0.104	0.014	0.006	0.028 2	0.040	0.000 6	0.008 2
212 XXX 58	0.054	3.21	0.103	0.015	0.006	0.029 3	0.040	0.000 8	0.007 6

3.2 过程氮含量分析

现工艺过程氮含量控制主要通过 RH 炉环流氮气,配以部分氮化硅锰合金增氮,在真空环境中进行钢液循环,利用真空度变化控制氮在钢水中的含量,达到稳定控氮的目的。浇次中间包氮含量平均值为 0.007 6%,标准差为 0.000 345。工序氮含量变化情况见图 1。

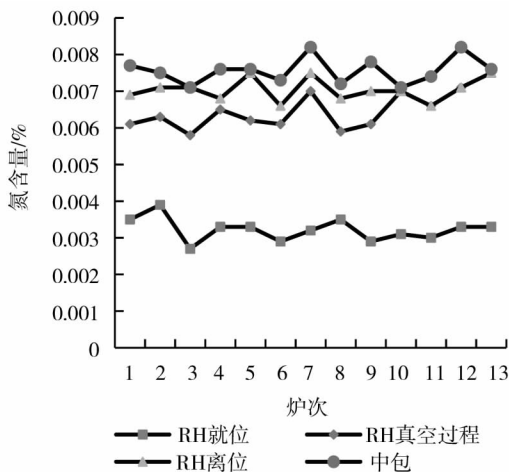


图1 工序过程氮含量控制变化图

3.3 过程铝含量分析

RH 精炼炉在冶炼过程中四次调整铝含量,使过程铝含量稳定在 0.033 0% 左右,保证离位铝含量

精确控制在 0.030% ~ 0.031%,铸机浇注平均铝损为 0.002 6%,铝命中率稳定。其中浇次第一炉铝损达到 0.005 4%,RH 离位适当提高铝含量约 0.002 个百分点,稳定控制开浇对成分命中的影响。工序铝含量变化情况见图 2。

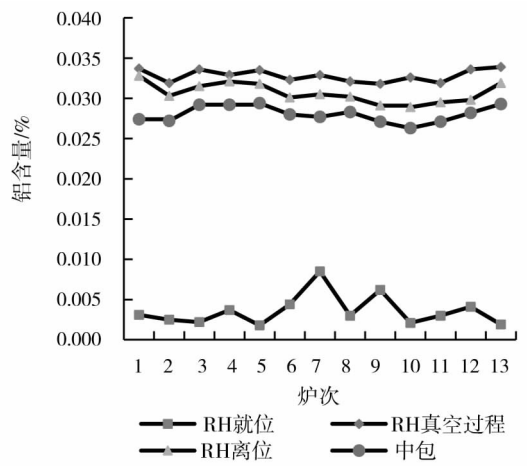


图2 工序过程铝含量控制变化图

3.4 铸坯全氧

根据该批次取向硅钢铸坯全氧检验结果,铸坯全氧质量分数控制在 0.000 4% ~ 0.001 4%,平均 0.000 8%。整体铸坯全氧含量控制较好,钢质洁净度高<sup>[4]</sup>。该批次中间包氧含量控制情况见图 3。

(下转第 18 页)

## 6 结论

(1)头坯表面质量和皮下气泡均沿铸坯长度增加逐步改善,当长度大于1.6 m后基本趋于稳定。

(2)头坯中心疏松级别在铸坯长度1 m处存在超标现象,而中心偏析未见异常。

(3)头坯中氧、氮含量均沿铸坯长度的增加呈降低趋势,并且长度大于4 m后与正常稳态坯的水平接近。

(4)头坯中夹杂物数量随着铸坯长度的增加呈减少趋势,并且在长度5 m处达到正常稳态坯的水平;夹杂物组成主要为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、TiN和 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiN}$ 的复合夹杂物,且在头坯1 m处发现大型 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{CaO}$ 复合夹杂物,最大尺寸约 $300 \mu\text{m}$ 。

(5)头坯轧制钢板产品缺陷主要为脱氧产物 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 类和结晶器液位波动卷渣类皮下夹杂,一般产生于距铸坯头部3.5 m以内,通过采取人工火焰扒皮清理工艺,可有效改善头坯质量。

### 参 考 文 献

[1] 陈俊杰,刘建华,刘建飞,等. IF钢连铸坯表层夹杂物[J]. 北京科技大学学报,2011,33(1):

173 - 178.

[2] YB/T 2012—2014. 连续铸钢板坯[S].

[3] YB/T 4003—2016. 连续铸钢板坯低倍组织缺陷评级图[S].

[4] GB/T 11261—2006. 钢铁氧含量的测定脉冲加热惰性气体熔融—红外线吸收法[S].

[5] GB/T 20124—2006. 钢铁氮含量的测定惰性气体熔融热导法(常规法)[S].

[6] 肖鹏程,朱立光,刘海春,等. IF钢非稳态连铸坯洁净度定量分析[J]. 钢铁钒钛,2017,38(3):112 - 116.

[7] 王敏,包燕平,崔衡. IF钢中 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiN}$ 复合夹杂生成机理研究[J]. 钢铁研究学报,2010,22(7):29 - 32.

[8] 傅杰,朱剑,迪林. 微合金钢中TiN的析出规律研究[J]. 金属学报,2000,36(8):801 - 804.

[9] 严文涛,史永强,陈科. SPHC系列钢种连铸坯表层夹渣缺陷手工清理工艺改进研究[J]. 工艺与技术,2017,(18):98 - 99.

[10] 逯登尧,王金海,刘蕾. 连铸坯表面夹渣分析及预防措施[J]. 山东冶金,2008,30(1):49 - 51.

(上接第7页)

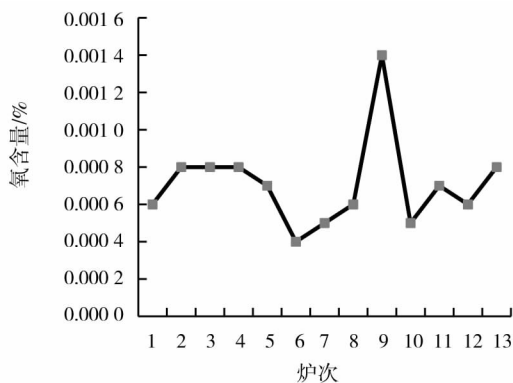


图3 工序过程中间包氧含量控制图

## 4 结论

(1)通过优化高磁感取向硅钢转炉、RH炉、铸机全产线工艺,稀土钢板材公司实现了高磁感取向硅钢13炉次稳定连浇,铸坯化学成分稳定,性能良好,满足下游工序轧制需求。

(2)通过RH炉环流全程采用氮气,同时利用真空环境控制钢水氮含量,钢中氮含量可以控制在

0.007 0% ~ 0.008 3%之间,满足取向硅钢AlN形成所需条件。

(3)通过RH工序四次微调成分,可以精确调整冶炼过程中钢水多种成分含量在较窄范围内,满足成分设计要求。

### 参 考 文 献

[1] 杨明波,谭磊,李上民. 高磁感取向硅钢研究开发的关键工艺及其研究进展[J]. 重庆理工大学大学学报(自然科学版),2021,35(4):1 - 3.

[2] 陈颖,刘静,程朝阳,等. 无取向硅钢RH精炼过程中夹杂物行为研究[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版),2019,42(1):1 - 7.

[3] 卢晓禹,王少炳,黄利,等. 取向硅钢热轧钢带BTQ001研制与开发[J]. 特殊钢,2020,41(5):38 - 41.

[4] 杨丽,孙雅平. 薄板连铸连轧生产取向硅钢100HD的试制研究[J]. 电工钢,2021,3(3):17 - 20.